МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

КГЭУ

На правах рукописи

Ньетерейе Фредерик

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ВНУТРЕННИХ ГАЗОВЫХ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Специальность: 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:

Доктор физико-математических наук, профессор

Усачев Александр Евгеньевич

Казань – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ... 3

ГЛАВА 1. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ: МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ... 13

1.1. Типы и характеристики частичных разрядов. Модель многослойной изоляции ... 15

1.2. Методы регистрации частичных разрядов ... 27

1.3. Регистрация и оценка частичных разрядов электрическим методом. ... 34

1.4. Выводы к главе 1 ... 51

ГЛАВА 2. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ «ПЛОСКИЙ КОНДЕНСАТОР» ... 52

2.1. Конструкция испытательной установки ... 53

2.2. Расчёты электрического поля в ИЯ «диск-диск» ... 56

2.3. Измерения частичных разрядов и результаты исследования ... 71

2.4. Выводы к главе 2 ... 79

ГЛАВА 3. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В УСТАНОВКЕ С ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКОЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ... 80

3.1. Конструкция ячейки и методика проведения измерений ... 80

3.2. Расчёты ЭП электродной системы кюветы ... 91

3.3. Измерение ЧР в образцах изоляции в кювете ... 98

3.4. Выводы к главе 3 ... 115

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ... 116

Работы автора, в которых опубликованы основные результаты диссертации ... 118

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ... 121

БЛАГОДАРНОСТИ ... 136

ПРИЛОЖЕНИЯ ... 137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Одной из основных задач электроэнергетики является надёжное и бесперебойное снабжение потребителей. Она решается целой системой организационных, технических и технологических мероприятий. Одним их таких мероприятий является система контроля состояния изоляции высоковольтного электрооборудования. Среди множества методов и методик контроля состояния изоляции выделяется диагностика состояния по методу частичных разрядов (ЧР). В настоящее время он считается лучшим методом для обнаружения дефектов на ранних стадиях их развития. Ежегодно в мире этим методов проводится контроль изоляции более 80% парка всех турбогенераторов (ТГ), силовых трансформаторов (СТ) и кабельных линий электропередачи (КЛЭП) с номинальным напряжение 110 кВ и выше. Измерения ЧР в электротехнических устройствах существенно отличаются от измерений в лабораторных условиях, для объяснения результатов которых была создана модель ЧР. Десятки тысяч исследователей проводят исследования по совершенствованию базовой модели ЧР и адаптации её к реальным условиям наблюдения. Выбор темы диссертации – «Разработка методики определения размеров внутренних газовых дефектов изоляционных конструкций по характеристикам частичных разрядов» является **актуальным и обоснованным**.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие представлений о самостоятельных разрядах в газах и практического применения теории для контроля состояния изоляции внесли такие российские учёные и специалисты, как Александров А.Ф., Базелян Э.М., Исмагилов Ф.Р., Кучинский Г.С., Коробейников С.М., Лавринович В.А., Месяц Г.А., Монастырский А.Е., Овсянников А.Г., Райзер Ю.П., Шахнин В.А., Вдовико В.П., Русов В.А. и др. Среди зарубежных авторов следует отметить работы Paschen F., Townsend J.S.E., Illias H. A., Ju Li, Pan C. и др.

При контроле состояния изоляции работающих трёхфазных электроустановок методом частичных разрядов остаются недостаточно определёнными характерные признаки принадлежности сигналов ЧР определённым типам дефектов изоляции, что снижает предсказательную способность метода ЧР.

Методология и методы исследования

Целью диссертации является создание методики определения размеров внутренних газовых дефектов в изоляционном материале по характеристикам частичных разрядов, возникающих в таких дефектах, на основе измерения характеристик ЧР в искуственно созданных дефектах различного размера, которая позволяет повысить достовернсть метода ЧР и способствует повышению надёжности изоляционных материалов,

Объект исследования: газовые дефекты внутри твердой изоляции высоковольтного электрооборудования.

Предмет исследования – установление связи между характеристиками электрических разрядов в газовых дефектах изоляции, размерами дефектов и их изменением под действием частичных разрядов.

Основные задачи диссертации:

1. Провести обзор литературы по связи характеристик частичных разрядов в изоляции высоковольтного электрооборудования с типом и размерами дефектов изоляционных материалов.

2. Создать экспериментальную установку и методику измерений ЧР в газовых дефектах изоляции, в которой исключаются внешние посторонние сигналы, которые могут быть приняты за сигналы ЧР.

3. Разработать программы для расчётов электрических полей во внутренних полостях газовых дефектов образцов изоляционных материалов, а также программы для расчёта параметров измеряемых ЧР. Выполнить модельные расчёты характеристик ЧР.

4. Провести измерения ЧР в газовых дефектах различных размеров.

5. Предложить критерии разделения различных типов ЧР и однотипных ЧР, приходящих от разных фаз высоковольтных аппаратов.

Методы исследования

Для достижения поставленных целей были применены элементы теории электрических разрядов в газах и частичных разрядов, теории вероятностей и математической статистики. Основными методами исследования были измерение параметров частичных разрядов, возникающих внутри созданных дефектов изоляционных материалов различных размеров на частоте 50 Гц, и их анализ.

Для решения задачи измерения и анализа частичных разрядов в газовых включениях с целью определения технического состояния твердой изоляции, напряженность электрического поля в газовых дефектах твердого изолятора рассчитывалась методом конечных элементов с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics 6.2. Моделирование частичных разрядов (ЧР) проводилось в MultiSim, а для обработки результатов также использовались вероятностные и статистические методы с помощью программного обеспечения Delphi 7, LabVIEW и OriginLab. Метод конечных элементов использовался для расчета коэффициента неоднородности электрического поля для образцов с газовыми дефектами различного размера. Моделирование в MultiSim позволило определить фазовый угол между током и напряжением в ячейке во время измерений частичных разрядов (ЧР). Для ячейки со сферическим электродом и радиусом кривизны 25 мм были рассчитаны ожидаемые параметры частичных разрядов в зависимости от размера дефекта изоляции. Были определены статистические параметры, позволяющие воспроизводить частичные разряды (ЧР), зарегистрированные за заданный период, и рассчитывать время и напряженность возникновения частичных разрядов.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов определяются:

– использованием цифрового осциллографа с частотой дискретизации 2 ГГц для измерения времени возникновения ЧР (фазы ЧР), что соответствует требованиям ГОСТ 55191 – 2012 в пункте 4.3.2.2;

– калибровкой измерительной цепи по ГОСТ 55191 –2012, которая производилась подачёй однополярных и биполярных импульсов с различными длительностями переднего фронта от генератора сигналов произвольной формы марки AFG1021;

– использованием при моделировании ЧР общепризнанных программных продуктов;

– совпадением результатов моделирования ЧР и экспериментальных исследований;

– использованием апробированных методик и современных программных продуктов для обработки экспериментальных данных.

Полученные результаты не противоречат известным теоретическим положениям.

Научная новизна:

1. В одном газовом дефекте внутри изоляции с размерами вдоль поля от 0,15 мм до 0,5 мм обнаружено возникновение только по одному ЧР в первой и третьей четверти периода синусоиды приложенного к изоляции напряжения в диапазоне до 15 кВ, что по величине напряжённости электрического поля в изоляции реальных объектов эквивалентно приложению напряжения до 100% от номинального. Разность фазовых углов возникновения таких «парных» разрядов составляет 150 – 180°. Изменения фазового угла возникновения и числа ЧР за период наблюдения (400 часов) не происходит.

2. Возникновение только 2 ЧР за один период синусоиды промышленной частоты объяснено тем, что объёмный заряд, образующийся из электронов, положительных и отрицательных ионов после прохождения лавин ЧР в газовых дефектах исследованных размеров в отрицательном полупериоде синусоиды промышленной частоты, к моменту последующего

частичного разряда в положительном полупериоде уменьшается за счёт рекомбинации частиц настолько, что его можно не учитывать на частоте 50 Гц.

3. Разработана новая методика определения размеров газовых дефектов в направлении вдоль силовых линий электрического поля в изоляционных материалах по характеристикам частичных разрядов. Методика состоит в следующей последовательности действий:

– расчёт коэффициента неоднородности ЭП внутри возможных типов дефектов;

– измерение напряжения возникновения ЧР в положительном полупериоде;

– определение средней напряжённости ЭП в момент возникновения ЧР;

– определение напряжённости ЭП внутри каверны дефекта при возникновении ЧР;

– определение размера дефекта вдоль силовых линий поля.

Получена экспериментальная формула зависимости напряжённости возникновения ЧР от размеров дефектов вдоль поля в диапазоне от 0,15 мм до 0,5 мм.

4. Предложены следующие признаки ЧР, возникающих внутри газовых дефектов:

– фазовый угол возникновения ЧР ($f_{ЧР}$) находится в диапазоне $f_{min} < f_{ЧР} \leq 90°$ и $180º + f_{min} < f_{ЧР} \leq 270°$, f_{min} – характеристика изоляции высоковольтного аппарата, уменьшение f_{min} – рост дефекта;

– ЧР должен быть двойным с различием фаз $df_{ЧР} = 150–180°$ возникновения ЧР в разных полупериодах синусоиды;

– число ЧР в одном дефекте должно равняться 100 за 1 секунду и слабо зависеть от времени.

Теоретическая и практическая значимость

К теоретической значимости работы относится подтвержденное экспериментально доказательство исчезновения остающегося объёмного

заряда после ЧР в отрицательном полупериоде к моменту возникновения ЧР в положительном полупериоде в той же каверне газового дефекта изоляции при частоте высокого напряжения 50 Гц и методика определения размеров дефекта изоляции по напряжению возникновения ЧР. Доказательство отсутсвия остающегося объёмного заряда основано на факте соответствия измеренных в работе напряжённостей вознкновения ЧР в газовых порах изоляционного материала в положительном полупериоде с пробивными напряжённостями разрядных промежутков соответствующих размеров при атмосферном давлении, в которых объёмный заряд отсутствует.

Практическая значимость состоит в том, что полученные в диссертации результаты позволяют усовершенствовать методику контроля состояния изоляционных материалов высоковольтного электрооборудования методом частичных разрядов:

- разделить ЧР, возникшие в разных фазах;
- объяснить регистрацию ЧР при малых полях, недостаточных для возникновения самостоятельного разряда, без гипотезы остаточного объёмного заряда;
- отделить ЧР, возникающие в газовых дефектах внутри изоляционного материала от поверхностных и коронных ЧР;
- оценить размер дефекта по характеристикам ЧР.

Усовершенствованная методика позволяет повысить достоверность метода ЧР и способствует повышению надёжности изоляционных материалов,

На защиту выносятся:

1. Измерительная ячейка (ИЯ) и методика проведения экспериментов, позволяющие измерять характеристики ЧР, возникающих только внутри газовых дефектов образцов диэлектрического материала, контактактным электрическим методом с датчиком ЧР в цепи заземления ИЯ.

2. Результаты расчётов параметров электрических полей и частичных разрядов в газовых дефектах изоляционных материалов.

3. Экспериментальное обнаружение факта, что напряжение возникновения ЧР ($U_{ЧР}$) не зависит от амплитудного значения приложенного высокого напряжения и меньше по модулю в отрицательном полупериоде ($U_{ЧР+} > U_{ЧР–}$). Различие величин $U_{ЧР}$, выходящее за погрешности измерений, объяснено различием скоростей изменения плотности зарядов на электродах за счёт электростатической индукции.

4. Признаки, которым обладают частичные разряды, возникающие внутри газовых дефектов изоляционных материалов:

- частичные разряды, возникающие в газовых дефектах без проводящих включений внутри изоляции с размерами вдоль поля от 0,15 мм до 0,5 мм при напряжениях, соответствующих напряжениям на изоляции электротехнических устройств до номинального, происходят по одному разу в четвертях синусоиды промышленной частоты, в которых модуль напряжения возрастает, т. е. частота ЧР для одиночного дефекта равна 100 Гц;

- фазовые углы возникновения ЧР в положительном и отрицательном полупериодах различаются на 150°–180° и слабо зависят от времени воздействия напряжения;

- для каждого типа изоляционного материала существует минимальный фазовый угол, менее которого не могут возникать ЧР, зависящий как от свойств материалов, так и геометрии изоляционной конструкции.

5. Новая методика оценки размеров газовых дефектов в изоляционных материалах по характеристикам частичных разрядов. Методика состоит в следующей последовательности действий:

– расчёт коэффициента неоднородности ЭП внутри возможных типов дефектов;

– измерение напряжения возникновения ЧР в положительном полупериоде;

– определение средней напряжённости ЭП в момент возникновения ЧР;

– определение напряжённости ЭП внутри каверны дефекта при возникновении ЧР;

– определение размера дефекта вдоль силовых линий поля.

Аппроксимацией результатов измерений напряжения возникновения ЧР и моделирования электрического поля в дефектах получена формула зависимости напряжённости возникновения ЧР от размеров дефектов в диапазоне от 0,15 мм до 0,5 мм.

Апробация работы

Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 конференциях различного уровня: на XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX Всероссийских аспирантско-магистерских научных семинарах, посвященный Дню энергетика, Казань, КГЭУ, 2022, 2023, 2024, 2025 гг.; на международной научно-технической конференции «Технологический суверенитет и цифровая трансформация», Казань, 2023; на международных молодежных научных конференциях «Тинчуринские чтения», Казань, 2024, 2025, 2026 гг.; на международной научной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление», Казань, 2025 г.; на международной научно-практической конференции «Цифровые системы и модели»: теория и практика проектирования, разработки и использования, Казань, 2026 г.

Публикации

Основное содержание работы изложено в 14 научных публикациях: 2 статьи в рецензируемом научном издании, входящем в перечень ВАК, 1 свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026669962, 1 статья в других изданиях и 10 публикаций в материалов докладов на международных и всероссийских научных конференциях, включенных в РИНЦ.

Реализация результатов диссертации

Результаты диссертации внедрены в научно-производственную деятельность Общества с ограниченной ответственностью «Управляющая компания «Комплексное ЭнергоРазвитие-Холдинг» (ООО «УК «КЭР Холдинг»), г. Казань, ООО «Инженерный центр «Энергопрогресс», г. Казань,

и в учебную деятельность Казанского государственного энергетического университета на кафедре «Электрические станции им. В.К. Шибанова», о чем имеются соответствующие акты (Приложение 6).

Личный вклад автора

Автор лично участвовал во всех этапах получения результатов, представленных в диссертации и публикациях: создание экспериментальной установки для измерения частичных разрядов, разработка и интерпретация результатов, составление диаграмм и экспериментальных схем для обработки результатов измерений в средах Delphi и OriginLab, проведение экспериментальных исследованиях в лаборатории высоких напряжений кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» в КГЭУ, создание моделей в средах Multisim и Comsol Multiphysics, анализ и сравнение теоретических и экспериментальных результатов, подготовка отчетов, участие в презентациях на научных конференциях и написание научных статей.

Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует специальности 2.2.8 - «Методы и приборы контроля и диагностики материалов изделий веществ и природной среды» по пунктам Паспорта специальности:

1. Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

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.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы и приложений. Общий объем диссертационной работы 162 страницы, включая 6 приложений. Работа иллюстрирована 12 таблицами и 43 рисунками. Библиографический список состоит из 139 наименований.

Содержание работы

Во введении приведена общая характеристика работы. Обосновывается актуальность темы, научная новизна, цель и основные задачи диссертационного исследования, приводится практическая значимость работы и перечислены основные положения, выносимые на защиту, апробации, личный вклад автора и краткое содержание.

В первой главе рассматривается состояние знаний о частичных разрядах в изоляции высоковольтного электрооборудования. Эта глава разделена на две части: в первой части рассматриваются физические явления, связанные с возникновением частичных разрядов, и результаты исследований ЧР, выполненные другими исследователями. Во второй части представлены различные методы и схемы регистрации ЧР, которые можно использовать для обнаружения и измерения частичных разрядов. Глава завершается формулировкой целей исследования и их значимости.

Во второй главе представлено создание и разработка системы измерения частичных разрядов в твердой изоляции высоковольтного электрооборудования для анализа, измерения, обнаружения и регистрации частичных разрядов внутри газовых дефектов в твердой изоляции. Были созданы 2 модели измерительной ячейки («сухая» и «с трансформаторным маслом» измерительная ячейка), и результаты моделирования частичных разрядов (ЧР) с использованием этих моделей были получены в среде Comsol Multiphysics и обработаны в программном обеспечении Delphi и MultSim. Представлены амплитудно-фазовые диаграммы (АФД), позволяющие отличить ЧР в дефектов изоляции от других дефектов изоляции. Была

выбрана подходящая стандартная модель для измерения частичных разрядов (внутри газовых дефектов в твердой изоляции) (измерительная ячейка «с трансформаторным маслом»), а результаты интерпретируются в главе 3.

В третьей главе был проведен анализ условий, при которых возникают ЧР в твердой изоляции высоковольтного электрооборудования, и обсуждена интерпретация результатов измерения частичных разрядов внутри газовых дефектов в твердой изоляции. Для ячейки, в которой электроды имеют шароподобную форму с радиусом кривизны 25 мм, рассчитаны ожидаемые параметры ЧР в зависимости от размеров дефектов изоляции. Рассмотрены некоторые проблемы измерения и интерпретации ЧР в изоляции работающего под нагрузкой электротехнического оборудования. Экспериментально показано, что ЧР в образце с одиночным газовым дефектом происходят дважды за период синусоидального напряжения промышленной частоты в 1-ой и 3-ей четверти при одинаковой по модулю напряжённости электрического поля внутри газовой полости дефекта. Изменений напряжения возникновения и амплитуды ЧР при длительном (400 часов) воздействии на изоляцию ЧР с фазовым углом возникновения около 45° не наблюдалось. Признаков деградации изоляции в стенках каверны дефекта за этот период не обнаружено.

В заключении изложены основные результаты и выводы.

ГЛАВА 1. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ: МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Надёжность работы электрооборудования зависит от способности его изоляции сохранять свои изоляционные свойства при воздействии различных видов высокого напряжения на протяжении всего срока эксплуатации. В процессе эксплуатации в изоляции могут возникать различного рода дефекты, ослабляющие изоляционные свойства и приводящие к возникновению в их области электрических разрядов. Такие разряды, которые затрагивают только часть изоляции и не приводят к её полному пробою, называют частичными разрядами ЧР [1-3]. Возникновения электрического разряда в изоляции сопровождается высокой температурой электронов в разряде, ударными волнами, излучением электромагнитных волн в диапазонах от инфракрасного до рентгеновского. Эти разряды, обладая малой мощностью, имеют высокую повторяемость и их воздействие на изоляцию приводит к ухудшению изоляционных свойств. В настоящее время именно частичные разряды считаются ответственными за необратимое ухудшение свойств изоляции, называемое процессом старения. Считается, что дефекты малых размеров под действием ЧР в них увеличиваются в размерах, поверхности дефектов в органических материалах обугливаются, приобретая проводящие свойства, что при достижении определённых размеров дефектов приводит к сквозному пробою изоляции и возникновению аварийных ситуаций. Обнаружение ЧР в изоляции, позволяет обнаруживать дефекты на ранней стадии их развития и планировать своевременное проведение планово-восстановительных ремонтных работ. Контроль состояния изоляции по наличию в ней частичных разрядов является обязательным видом контроля различного высоковольтного оборудования. Порядок, объём и нормы проведения такого контроля регулируются различными регламентирующими документами и стандартами [4-6]. Десятки фирм выпускают первоклассное оборудования для различных способов регистрации ЧР: *DIMRUS* (Пермь, РФ), *BAUR GmbH*

(Австрия, представитель в РФ фирма Пергам, Москва), *IRIS Power LP* (Канада, Миссиссога) и др. Если с аппаратурой и методами измерения ЧР почти всё обстоит благополучно, то в способах представления и интерпретации результатов диагностики изоляции методом ЧР остаётся ещё достаточно много неясных моментов. В основном это связано с тем, что реальные объекты энергетики по многим параметрам значительно отличаются от лабораторных образцов, для которых была создана модель ЧР. Объяснения некоторых неясных моментов при интерпретации ЧР даются в данном диссертационном исследовании.

1.1. Типы и характеристики частичных разрядов. Модель многослойной изоляции

Частичный разряд (ЧР) – электрический разряд, который возникает в изоляции электрооборудования среднего и высокого классов напряжения, который шунтирует только часть изоляции в электроизоляционной системе [6].

Различают следующие типы частичных разрядов.

1. ЧР внутри газовых полостей дефектов изоляции. Полости могут быть разных форм и размеров. По состоянию внутренних поверхностей полостей можно предложить, как будет показано в главах 2 и 3, разделить их на полости с наличием проводящих металлических включений и без таких включений. Дефекты такого типа являются преобладающим типов дефектов в изоляции электрооборудования.
2. Поверхностный ЧР. Разряд в газе вдоль (над) поверхности изоляции. Частичные дуги.
3. Импульсный коронный разряд. Униполярный коронный разряд вблизи отрицательного электрода малой кривизны (импульсы Тричела).
4. ЧР в твёрдом диэлектрике.
5. ЧР в трансформаторном масле (жидком диэлектрике).

Ряд авторов подходят к классификации типов ЧР более детально и подразделяют ЧР на 7 или даже на 13 типов. Например, разряд 4 типа – ЧР в твёрдом диэлектрике можно разделить на ЧР на участках потенциального и заземлённого электродов с малыми радиусами кривизны, на окончаниях ветвей дендритной структуры и водного триинга.

1.1.1. Модель изоляции с дефектом и характеристики ЧР

Общий вид изоляции с дефектом и электрическая схема замещения такой изоляции представлена на рис. 1.1 [1].

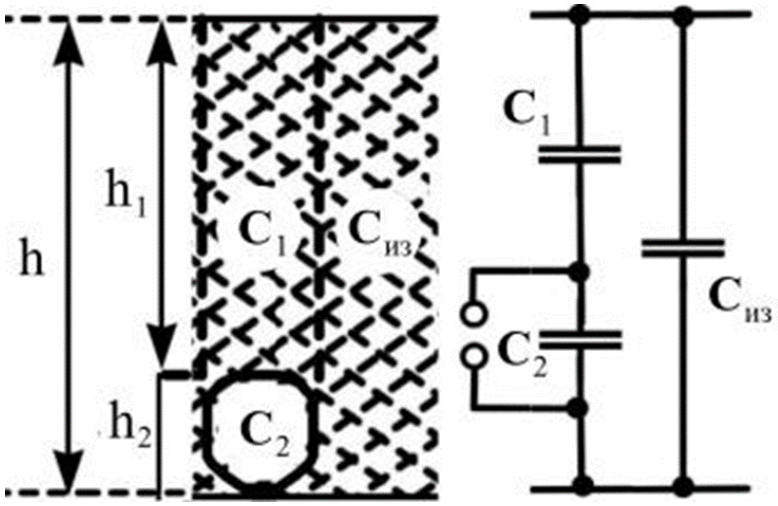


Рис. 1.1. Вид изоляции с дефектом и её схема замещения

В модели многослойной изоляции (далее модель ЧР) вся изоляция разделяется на неповреждённую часть, обозначаемую символом $C_{из}$ и столбик изоляции, в котором есть газовый дефект. Столбик состоит из 2 последовательно соединённых участков – изоляции (C_1) и каверны дефекта (C_2). Если каверна дефекта не соприкасается с токоведущими частями конструкции, то в схеме в столбике изображают три последовательно соединённые ёмкости [1], которые при расчёте параметров ЧР сводят к схеме рис. 1.1. Контакт каверны дефекта с металлом токоведущих частей не

сказывается на величинах параметров ЧР, но оказывает по мнению авторов [2,3] влияние на число ЧР за единицу времени.

Электрическая прочность газового дефекта (C_2) меньше прочности твёрдой изоляции, в которой он возник. При повышении напряжения на изоляции при достижении напряжённости внутри каверны дефекта величины, достаточной для образования самостоятельного разряда, происходит электрический разряд (ЧР) внутри дефекта. Величина напряжения, приложенного к изоляции в момент возникновения ЧР является одной из двух основных измеряемых характеристик одиночного ЧР.

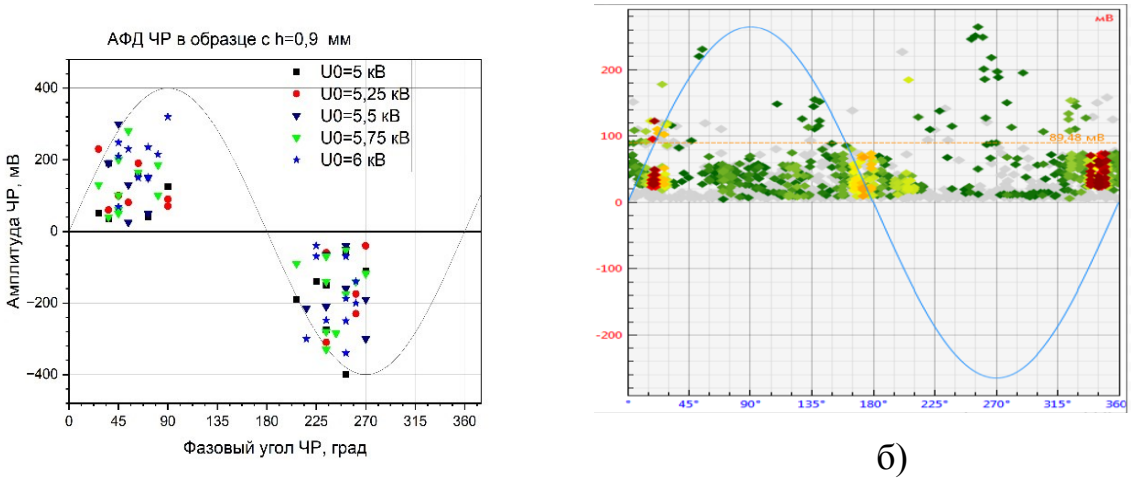
1. Напряжение возникновения ЧР ($U_{\text{ЧР}}$) – напряжение, при котором в изоляции возникает ЧР. При измерении ЧР на напряжении промышленной частоты (f=50 Гц) часто вместо $U_{\text{чр}}$ измеряют фазовый угол ($\varphi_{\text{ЧР}}$), при котором происходит ЧР. Такая техника измерения $U_{\text{ЧР}}$ пригодна для случаев, когда известно амплитудное значение напряжения (U_0) в месте возникновения ЧР. Тогда при измеренном $\varphi_{\text{ЧР}}$ напряжение $U_{\text{ЧР}}$ можно определить по формуле:

$$U_{\text{чр}} = U_0 \cdot \sin(\varphi_{\text{ЧР}}) \equiv U_0 \cdot \sin(2\pi f \cdot t_{\text{ЧР}}), \qquad (1.1)$$

где U_0 – амплитудное значение напряжения на высоковольтном электроде измерительной ячейки, $\omega = 2\pi f \cong 314$ – круговая частота промышленного напряжения 50 Гц, $t_{\text{ЧР}}$ – время от перехода напряжения через 0 на синусоиде напряжения до времени возникновения ЧР.

Результаты измерения ЧР часто представляют в виде синусоиды (реже эллипса) на которой ЧР располагаются в тех участках оси абсцисс синусоиды, которые соответствуют фазовому углу по (1.1). Такой способ представления результатов измерения ЧР в различных объектах является типичным и называется амплитудно-фазовой диаграммой частичных разрядов (АФД). В англоязычной литературе АФД называется фазово-разрешенный частичный разряд *Phase Resolved Partial Discharge (PRPD*) . На рис. 1.2 представлены два таких представления: выполненное в диссертации измерение ЧР в одиночном образце и силовом трансформаторе ТДЦ-

400000/500. Если в лабораторном исследовании ЧР наблюдались в диапазоне фазовых углов 15–90° и 195–270°, что соответствует теории газовых разрядов, то в трёхфазном трансформаторе ЧР наблюдались во всём диапазоне фазовых углов 0–360°. Такие диаграммы, как представленная на рис. 1.2, б, почти всегда наблюдаются в высоковольтных устройствах электроэнергетики.



а) б)

Рис. 1.2. АФД: а – ЧР в дефекте типа цилиндр, б – ЧР в ТДЦ-400000/500

На АФД рис. 1.2, б наблюдаются ЧР и вблизи фазовых углов 180° и 360°, т. е. при малых величинах приложенного к изоляции напряжения и малой напряжённости внешнего поля внутри газовых каверн дефектов. При таких малых значениях фазовых углов ЧР напряжения возникновения ($U_{\text{чр}}$) по (1.1) может оказаться недостаточно для развития самостоятельного разряда, т. е. существование таких разрядов в объектах энергетики, как кажется, противоречит теории газовых разрядов. Для объяснения такого видимого противоречия практики и теории разрядных явлений была высказана гипотеза о не полной деионизации объёмного заряда, возникшего в результате ЧР в каверне дефекта и оставшегося к моменту повторного ЧР в этом же дефекте. Поскольку высокая скорость деионизации электронов и положительных ионов объемного заряда, находящихся в газовой среде каверны дефекта, по оценкам приводила при частоте 50 Гц к почти полному

отсутствию заряженных частиц в каверне дефекта уже при прохождении напряжения через ноль [7], то было предположено, что заряженные частицы (электроны и ионы) находятся не в газовой среде дефекта, а на поверхности каверны и не могут диффундировать в объём газовой полости без приложения достаточного напряжения для их выхода из изоляции при смене знака приложенного к каверне напряжения. Такие заряды, «осевшие» («прилипшие») к стенкам каверны создавали бы дополнительное поле при смене знака напряжения, что приводило бы к разрядам при меньшем и даже нулевом напряжении. Такая гипотеза хорошо объясняла АФД, что привело к её широкому распространению у экспериментаторов [3]. Следует отметить, что авторы гипотезы не учли возможности наблюдения ЧР, произошедших в различных фазах, в каждом из датчиков ЧР, установленных в фазах работающих трехфазных устройств электроэнергетики [8, 9].

Общепринятый способ измерения напряжения возникновения ЧР по результатам определения фазы ЧР с последующим пересчётом по (1.1) хорошо работает в лабораторных условиях, где напряжение U_0 равно амплитудному значению фазного напряжения. При наблюдениях ЧР в объектах электроэнергетики, в которых обмотки фаз соединены по схемам «звезда» или «треугольник и не известно место возникновения ЧР, величина U_0 в (1.1) также неизвестна. Связь между фазовым углом, полученным при подстановке в (1.1) амплитудного значения фазного напряжения, и $U_{\text{чр}}$, пропадает, как и теряют физический смысл все характеристики ЧР, в которых $U_{\text{чр}}$ входит [10].

В схеме замещения модели ЧР на рис. 1.1 считается, что ЧР эквивалентен замыканию обкладок конденсатора C_2. В модели ЧР предполагается, что общий заряд на изоляции остаётся неизменным. До ЧР ёмкость столбика изоляции с дефектом (C_0) равнялась сумме последовательно соединённых ёмкостей C_1 и C_2. Считая, что поле однородно, а столбик дефекта имеет вид параллелепипеда с основанием S, получим:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h_1},\ C_2 = \frac{\varepsilon_0 S}{h_2},\ C_0 = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h_1 + \varepsilon h_2},\ dC_{\text{ст}} = C_0 - C_1 = \frac{-C_1}{1 + \frac{h_1}{\varepsilon h_2}} = \frac{-C_1}{k_{\text{ст}}} \quad (1.2)$$

При ЧР ёмкость столбика с дефектом увеличивается на величину $dC_{\text{ст}}$, т.е. при сохранении заряда на столбике с дефектом, можно записать:

$$q_{\text{ст}} = U_{\text{чр}} \cdot C_0 = U_1 \cdot C_1,$$

$$\text{тогда}\ \ dU_{\text{ст}} = U_{\text{чр}} - U_1 = {U_{\text{чр}}}\Big/{k_{\text{ст}}},\ \ k_{\text{ст}} = 1 + \frac{h_1}{\varepsilon h_2} \quad (1.3)$$

Импульс броска напряжения распространяется по токоведущим частям оборудования в обе стороны от места возникновения ЧР.

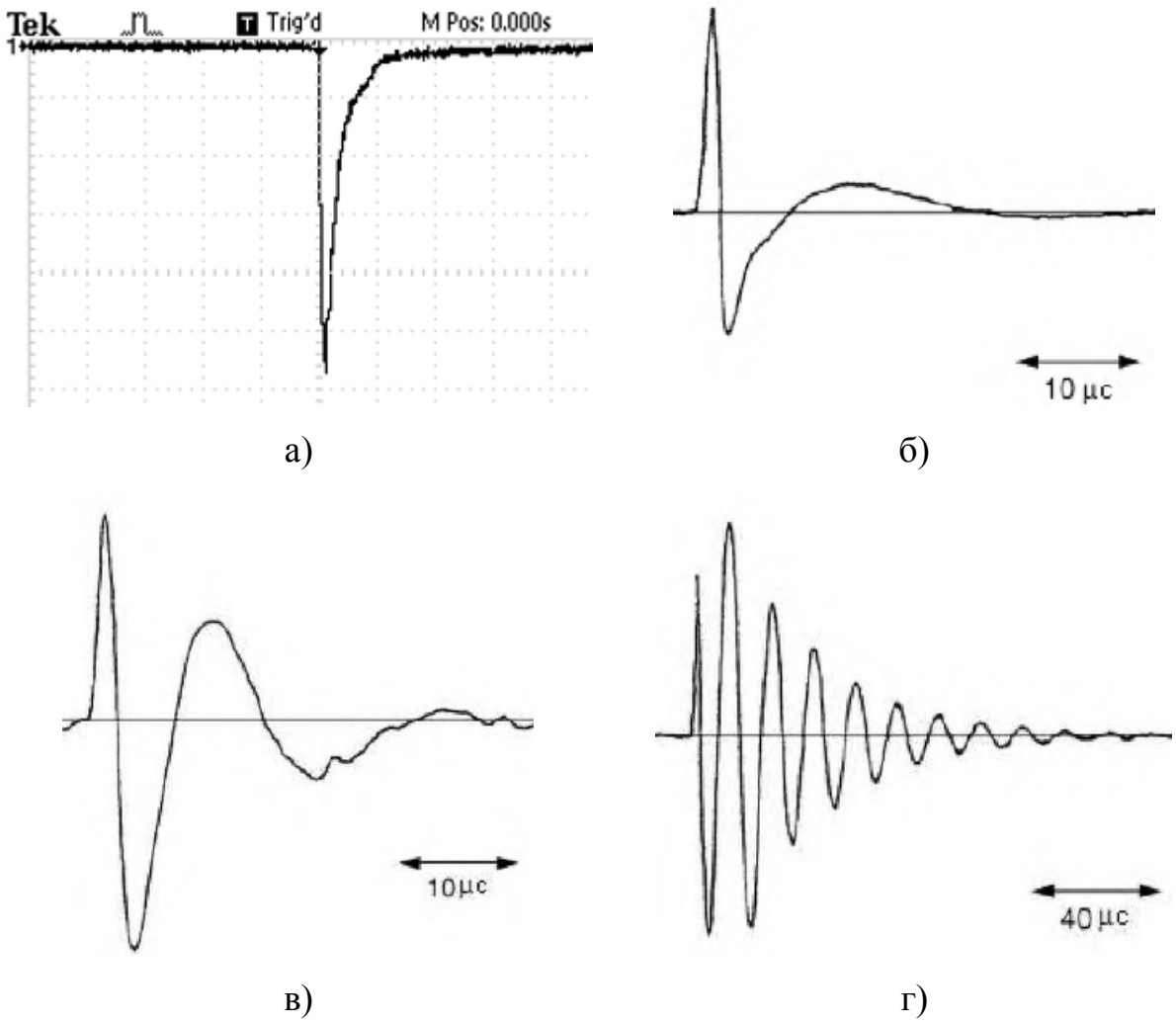
Напряжение при ЧР по модулю уменьшается, т.е. на положительном полупериоде синусоидального напряжения импульс ЧР отрицательный, а на отрицательном полупериоде – положительный. Длительность переднего фронта импульса измеряется в единицах наносекунд. В токоведущей части возникает дополнительная разность потенциалов и ток подзарядки возросшей ёмкости изоляции, в котором произошёл ЧР. Время восстановления заряда на ёмкости ($C_{\text{из}}$) описывается длительностью импульса ЧР (T_2), которая слабо связана с дефектом изоляции.

2. Бросок напряжения при ЧР (*dU*). В лабораторных условиях ЧР, как правило имеет вид импульса с апериодической формой (рис. 1.3, а). Амплитуда этого импульса принимается за ***dU*** и несёт информацию о дефекте. В объектах энергетики импульс ЧР имеет, чаще всего колебательную форму (рис. 1.3, б, в, г).

Колебательная форма ЧР вызвана наложением на апериодический ЧР периодического затухающего сигнала переходного процесса. Амплитуда переходного процесса равна амплитуде броска напряжения при ЧР, а частота определяется как частота свободных колебаний (ω) в сети [12]:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2},\quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},\ \beta = \frac{R}{2L}\quad , \quad (1.4)$$

где ω_0 резонансная частота, β – коэффициент затухания переходного процесса, *L, R, C* – индуктивность, активное сопротивление и ёмкость цепи.



а) б)

в) г)

Рис. 1.3. Вид ЧР при различных частотах переходного процесса:
а – [11], б, в, г – [6]

Переходной процесс, кроме начальной амплитуды, не связан с параметрами дефекта. Наложение апериодического ЧР и периодического затухающего сигнала переходного процесса приводит к необычной и разнообразной форме результирующего сигнала ЧР. Если сигнал ЧР имеет апериодическую форму, то его амплитуда равна броску напряжения при ЧР. В зависимости от частоты переходного процесса амплитуда первого максимума отличается от величины апериодического сигнала и измерение броска при ЧР по амплитуде первого экстремума дает заниженную величину ***dU***. Общепризнанного способа измерения величины броска напряжения ЧР при колебательной форме импульса, на данный момент, не существует.

Обсуждается вопрос, что принимать за амплитуду броска напряжения при колебательном импульсе ЧР: амплитуду первого пика, второго или самого большого? Неясности в этот вопрос добавляют замечания, что в модели ЧР считается неизменность заряда на испытуемой ёмкости, что подразумевает отсутствие влияния источника питания. В случае измерения ЧР внутри источников (работающие генераторы, трансформаторы) это условие может нарушаться. Вопрос остаётся нерешённым, хотя частично снимается калибровкой и введением понятия кажущийся заряд. Идея введения этого понятия проста. Поскольку при ЧР на изоляции уменьшается напряжение, то чтобы восстановить прежний уровень напряжения требуется подать в изоляцию дополнительный заряд. Такой заряд, поданный «мгновенно», назвали «кажущимся» зарядом. Идея хороша для лабораторных исследований, когда напряжение понижается сразу на всём объекте за время меньшее длительности переднего фронта импульса, а ёмкость объекта, в котором происходит ЧР, известна. При таких условиях можно аналогично (1.3) записать:

$$q_{\text{общ}} = U_{\text{чр}} \cdot (C_0 + C_{\text{из}}) = U_1 \cdot (C_1 + C_{\text{из}}),\ dU = U_{\text{чр}} \cdot \frac{dC}{C_{\text{из}}} \qquad (1.5)$$

$$q_{\text{чр}} = dU \cdot C_{\text{из}} = dU_{\text{ст}} \cdot C_1 \qquad (1.6)$$

3. Кажущийся заряд q ($q_{\text{чр}}$) (apparent charge) это 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 равен произведению броска напряжения на ёмкость изоляции по (1.6) [1-3].

Если в лабораторных условиях величина ёмкости объекта испытания $C_{\text{из}}$ известна, то что принимать за эту величину в кабельной линии длиной несколько десятков км. Аналогичный вопрос возникает и для другого оборудования (силовые трансформаторы, генераторы). Фирма *IRIS* при мониторинге турбогенераторов методом ЧР отказалась от использования

термина кажущийся заряд из-за неопределённости в величине $C_{\text{из}}$ и делает заключения о состоянии ТГ на основании величин бросков напряжения $dU_{\text{чр}}$.

4. Число ЧР за период синусоиды промышленной частоты

При описании ЧР наиболее часто в литературе повторяется картинка, приведённая в книге Кучинского [1] и представленная на рис. 1.4, которая объясняет множество ЧР в каверне дефекта за период синусоиды промышленной частоты.

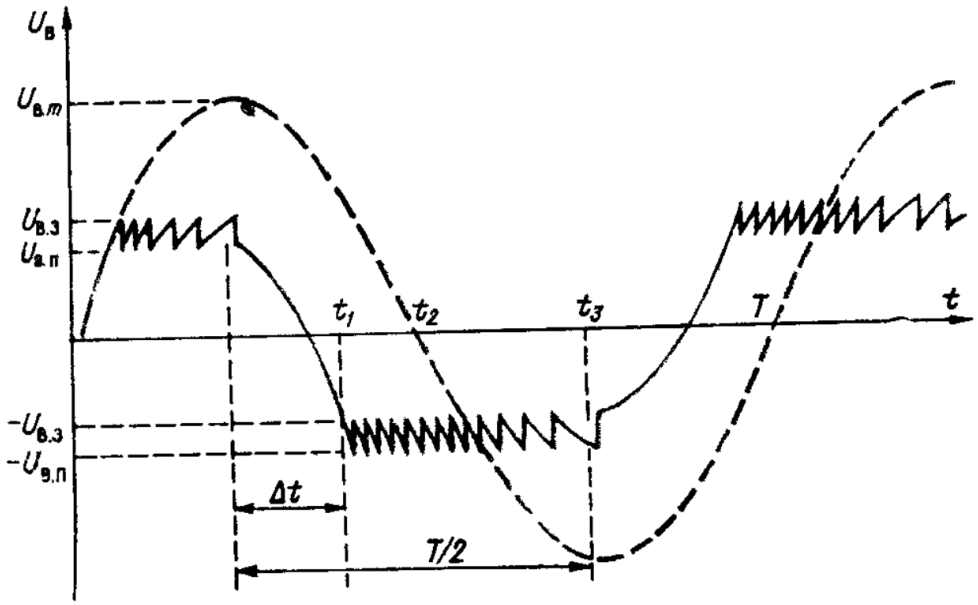


Рис. 1.4. Развитие по времени ЧР на переменном напряжении [1]

За 1 период синусоиды в каверне дефекта может возникнуть множество ЧР, в том числе и при нулевом приложенном внешнем напряжении. Эта теория предсказывала также возможность наблюдения ЧР во второй и четвёртой четвертях синусоиды (рис. 1.4). Согласно другому представлению о природе ЧР, они могут возникать только 2 раза за период при одинаковом по модулю напряжении в 1ой и 3ей четвертях, если площадь поверхности дефекта не превышает 1 см^2 [9]. Во 2ой и 4ой четвертях синусоиды ЧР наблюдаться не должны. Показывалось, что при больших размерах полостей для возникновения барьерного разряда нужно создание напряжённости электрического поля в газовой полости между диэлектриками, достаточные для возникновения самостоятельного разряда и зависящие только от

величины приложенного напряжения и расстояния между противоположными (относительно вектора поля) стенками полости.

В некоторых работах утверждается, что число ЧР, происходящих в положительном и отрицательном периодах синусоиды различаются в зависимости от расстояния между дефектом и электродом даже в однородном электрическом поле [3, 13].

Поскольку возникновение ЧР зависит от достижения внутри каверны газового дефекта напряжённости поля ($E_{\text{чр}}$), достаточной для развития самостоятельного электрического разряда, то важна не сама величина приложенного ко всей изоляции (рис. 1.1) напряжения $U_{\text{чр}}$, а только напряжения (U_2) на границах дефекта (ёмкости C_2). Средняя напряжённость в дефекте ($E_{2\text{ср}}$) в этом случае будет равна

$$E_{2\text{ср}} = \frac{U_2}{h_2} = \frac{U_{\text{чр}}\, C_1}{h_2(C_1+C_2)} = \frac{U_{\text{чр}}}{h_2+\frac{h_1}{\varepsilon}} \tag{1.7}$$

Отношение $E_{2ср}$ к средней напряженности в изоляции $E_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{чр}}}{h_1+h_2}$ равно:

$$\frac{E_{2\text{ср}}}{E_{\text{ср}}} = \frac{(h_1+h_2)\cdot\varepsilon}{h_1+h_2\cdot\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{1+\frac{h_2}{h}(\varepsilon-1)} \tag{1.8}$$

При $h_2 \ll h$ $E_{2\text{ср}}=E_{\text{ср}} \cdot \varepsilon$ – соответствует дефекту типа «щель».

В сферическом газовом дефекте поле однородно, а напряжённость внутри полости при удалении шара на расстояние более двух диаметров от потенциального электрода равна.

$$\frac{E_{2\text{ср}}}{E_{\text{ср}}} = \frac{3\varepsilon}{(1+2\varepsilon)} \tag{1.9}$$

Если электрическое поле внутри каверны дефекта неоднородно, то следует находить области с максимальной напряжённостью, в которых будет развиваться ЧР. Неоднородность поля внутри дефектов изоляции мала из-за малых размеров дефектов. При зарождении лавины электронов ЧР в области максимальной напряжённости возникает вторичная ионизация газа в объёме дефекта, что приводит к резкому ослаблению электрической прочности полости и к выполнению условия существования самостоятельного разряда в

тех областях дефекта, в которых оно не выполнялось до возникновения ЧР. При других формах дефектов, отличающихся от рассмотренных выше, связь между максимальной напряжённостью поля внутри дефекта и средней напряжённостью в изоляции обычно находят при расчётах электрических полей в изоляции с дефектом.

Знание величины максимальной напряжённости позволяет оценить размеры дефекта вдоль поля, что способствует более наглядному пониманию процессов деградации изоляции. Для различных расстояний в различными по форме электродами в открытых воздушных промежутках была установлена связь между напряжённостью пробоя промежутка и расстояния между электродами. Зависимость представлена на рис. 1.5 [8].

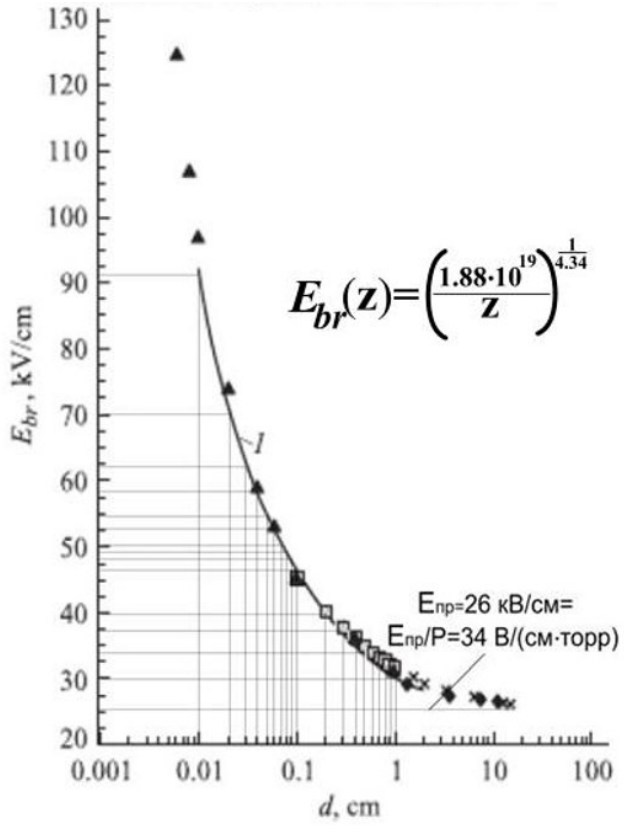


Рис.1.5. Зависимость пробивной напряжённости от расстояния между электродами

5. **Цикл измерения ЧР** (*PD measurement cycle*): Интервал времени с начала измерения и до окончания измерения ЧР, или – число периодов испытательного переменного напряжения в интервале времени измерения ЧР.

6. **Средний ток частичного разряда $I_{ср}$** (*average discharge current*): Производная величина, являющаяся суммой абсолютных значений индивидуальных амплитуд кажущихся зарядов q_i, в течение выбранного опорного интервала времени $T_{оп}$, деленная на продолжительность этого интервала

$$I_{ср} = \frac{1}{T_{оп}} \cdot \sum_{i=1}^{N} |q_i| \quad (1.10)$$

Как правило, средний ток разряда выражается в кулонах в секунду (Кл/с) или в амперах (А).

7. **Мощность разряда P** (*discharge power P*): Производная величина, являющаяся суммой произведений кажущихся зарядов с амплитудой q_i, на соответствующие мгновенные значения напряжения возникновения ЧР U_i в течение интервала времени измерения ЧР $T_{оп}$

$$P = \frac{1}{T_{оп}} \cdot \sum_{i=1}^{N} (q_i \cdot U_i) \quad (1.11)$$

Необходимо учитывать знак этих отдельно взятых значений.

Мощность разряда обычно выражается в ваттах (Вт).

8. **Энергия единичного ЧР – W** (*energy of single PD, W*): Производная величина, являющаяся произведением мгновенного значения напряжения возникновения ЧР U_i на его кажущийся заряд q_i,

$$W_i = q_i \cdot U_i \quad (1.12)$$

Энергия единичного ЧР выражается в Джоулях (Дж).

9. **Показатель повторения – число ЧР с наибольшм значением кажущегося заряда q_{max}, R_c** (*recurring PDs factor*): Показатель, указывающий на отношение периодов испытательного переменного напряжения, в которых возникают ЧР максимального значения кажущегося заряда, к общему количеству периодов в одном цикле измерения.

Примечание: Показатель находится в диапазоне от 0,0 до 1,0. Значение $R_c = 0{,}0$ соответствует регистрации единичного импульсного сигнала ЧР (или сигнала помех); Значение $R_c = 1{,}0$ соответствует зарегистрированным ЧР в каждом периоде напряжения.

1.2. Методы регистрации частичных разрядов

Методы диагностики состояния изоляции разделяются на две основных группах :

1) методы, основывающиеся на анализе амплитудного и амплитудно-фазового распределения импульсов ЧР. Их целью является определение типов имеющихся дефектов и оценка их влияния на остаточный ресурс высоковольтной изоляции.

2) Методы, базирующиеся на анализе параметров отдельных импульсов ЧР. В данных методах анализируются амплитудные и частотные параметры импульсов, а также связи между импульсами. Методы данной группы предназначены для повышения достоверности проводимых измерений за счет более эффективной отстройки от помех.

К действующим методам измерения, регистрации обнаружения частичных разрядов относят: электрический и электромагнитный, акустический, химический и оптический методы [14-24].

1. Электрический метод основан на измерении импульса тока или напряжения в системе при возникновении ЧР. Используются различные типы датчиков, каждый из которых устанавливается в отдельной области исследуемого объекта [3,25]. На данный момент реализованы и чаще всего используются 3 типа датчиков:

1.1. HVCC (High Voltage Ceramic Capacitors). Датчики HVCC основаны на использовании высоковольтного конденсатора связи. Эти датчики встроены непосредственно в линию и обеспечивают непрерывный мониторинг частичных разрядов. Использование таких датчиков возможно только при установке на каждую фазу исследуемого объекта, а для эффективной работы и локализации места ЧР - двух на каждой фазе. Данные устройства нашли свое применение на электродвигателях, генераторах, трансформаторах.

1.2. HFCT (High Frequency Current Transformers). Работа датчиков этого типа основана на явлении электромагнитной индукции. Частичный разряд вызывает импульс тока в линии. Аналогичный импульс возникает в изолирующем экране. Высокочастотный трансформатор улавливает импульсы и передает их параметры на прибор для измерения частичного разряда. Недостатками такого вида датчиков являются сложность установки, плохая помехоустойчивость.

1.3. TEV (Transient Earth Voltage) – датчик представляет собой конденсатор емкостного делителя. Второй конденсатор – это металлический корпус устройства, к которому прикреплен датчик. Как в и случае с датчиками HFCT, эта система обнаруживает импульсы тока, которые создают ЧР. Емкостные датчики предназначены для использования в ситуациях, когда использование датчиков HFCT или HVCC невозможно по конструктивным или другим причинам. Эти датчики могут быть установлены непосредственно на корпусе установки и проводить измерения без изменений в его работе [51]. Помимо очевидных преимуществ, таких как простота установки и использования, TEV - датчики имеют ряд недостатков, главным из которых является низкая помехоустойчивость, так как через заземление оборудования протекают не только импульсы, наводимые ЧР, но и другие высокочастотные процессы [50].

2. Акустический метод. Используется дистанционно и позволяет размещать датчики в КРУ и шинопроводах. Недостатком метода является низкая чувствительность при регистрации частичных разрядов малой интенсивности. При применении направленных акустических датчиков их калибровки – сложный процесс. Распространение сигнала ЧР зависит от наличия физических препятствий. Для локализации места возникновения ЧР требуется установка большого количества датчиков [26, 27]. Существенной и не решённой во многих случаях применения акустических датчиков является проблема подавления посторонних шумовых сигналов от различных частей электроустановки.

3. Химический (хроматографический**) метод** заключается в определении состояния изоляции по концентрации различных газов, присутствующих в трансформаторном масле. Возникновение практически любого типа дефекта в оборудовании сопровождается возникновением ЧР, которые приводят к различным химическим реакциям в изоляции. В результате таких реакций могут образоваться газообразные вещества. Образовавшиеся газы (водород, метан, этан, ацетилен и др.) растворяются в масле маслонаполненного оборудования. Разряды, возникающие в различных частях силового трансформатора, приводят к образованию разных газов. При ЧР основным газом является H_2, характерными газами с низким содержанием будут CH_4 и C_2H_2. На практике для хроматографического анализа используются два метода.

Первый, который используется чаще всего, заключается в отборе пробы масла в специальную емкость, транспортировку к месту проведения анализа и определение концентрации газов в специализированной лаборатории. Отбор проб проводится периодически (обычно 2 раза в год) при отсутствии резких изменений концентрации газов.

Второй способ состоит в установке специального датчика для определения концентрации одного газа непосредственно на трансформаторе. Датчиков может быть несколько или комбинированные датчики определяющие концентрацию заданного заказчиком набора газов. Определение концентрации выбранного набора газов производится автоматически с периодичностью 4 – 8 раз в сутки. Результаты замеров сохраняются в памяти устройства и могут передаваться по запросу на место оператора подстанции и/или переписываться в память мобильных систем диагностики при прибытии оперативной группы [38,39]. Такой способ всё чаще называют «он–лайн мониторинг». Все, что происходит с трансформатором либо другим исследуемым оборудованием, отображается в режиме реального времени. Точность определения концентрации газов хуже, чем в лабораторном методе, но это компенсируется возможностью иметь

текущие значения концентрации газов, а не полугодовой давности. В случаях резких изменений концентрации могут быть вызваны специалисты для проведения дополнительного и более точного лабораторного анализа.

4. Оптический метод основан на регистрации излучения, выделяемого ЧР, с помощью различных датчиков. Спектр излучения света варьируется от ультрафиолетового излучения до видимого диапазона в зависимости от энергии частичных разрядов [42,43,44].

Действующие оптические методами основаны на:

– датчике (фотодетекторе) ультрафиолетового диапазона;

– флуоресцентном датчике;

– оптоволокна с жилой, легированной флуоресцирующим веществом. Датчики такого типа встраивают в изоляцию, что обеспечивает более точное определение источника, генерирующего частичные разряды.

Одним из главных недостатков оптических датчиков является ограничение по углу приема. Данный недостаток присущ первым двум типам датчиков, вследствие чего они имеем низкую их чувствительность к выделяемому излучению. Для осуществления эффективного контроля исследуемого объекта на ЧР требуется большое их количество.

На сегодняшний день существует широкий спектр приборов и методов контроля частичных разрядов. Они существенно различаются как по стоимости оборудования, так и по достоверности определения состояния изоляции высоковольтного оборудования. Действующие методы обнаружения не всегда эффективны на ранних этапах развития частичного разряда. Одним из путей решения проблемы контроля состояния без снятия напряжения является использование коммутационных импульсов [48].

В каждом методе измерения и обнаружения ЧР используются разные датчики, использующие принцип преобразования электромагнитных и акустических колебаний в определенном диапазоне частот: низкочастотном, высокочастотном и СВЧ [49].

Частичные разряды являются основной причиной и надежным индикатором возникновения нарушений изоляции вводов и обмоток силовых трансформаторов, которые могут привести к возможным поломкам и дорогостоящим остановам.



Рис. 1.6. Различные виды датчиков для обнаружения ЧР.

Крайний слева – радиоволновой датчик, в центре – разные виды электрических датчиков. Крайний справа – акустический датчик [28].

1.2.1. Преимущества и недостатки методов измерения частичных разрядов

Появление ЧР сопровождается следующими физическими явлениями [93-95]: протекание импульсного тока в искусственно создаваемых цепях, где имеются объекты с ЧР; электромагнитное излучение в окружающее пространство; ударные волны; разложение диэлектрика на молекулярные группы в зоне действия ЧР; световое излучение в окружающее пространство; нагрев локальных объемов изоляции с ЧР. На основе этих физических явлений разработаны и совершенствуются методы обнаружения ЧР в различных видах оборудования и в разных условиях его эксплуатации, при

разработке новых конструкций и аппаратов, а также более эффективных технологических процессов изготовления изоляционных материалов.

В результате анализа литературы по ЧР [52-55] была составлена таблица (табл. 1.1), в которой суммированы сведения о преимуществах и недостатках методов измерения ЧР, типы используемых датчиков и области их применения.

Таблица 1.1. Преимущества и недостатки различных методов измерения частичных разрядов

№	Тип метода	Тип датчика	Область применения
1	**Электрический** **Преимущества**: 1) хорошая регистрация ЧР в лабораторной среде; 2) высокая чувствительность; 3) низкий уровень шума; 4) слабое затухание сигнала; 5) высокая точность. **Недостатки:** 1) необходимость в заблаговременном подключении к ОИ; 2) возможные регистрации ложных сигналов из-за высокой чувствительности; 3) уязвимость к электромагнитным помехам ЭМП.	Сверхвысокочастотный и высокочастотный соединительный конденсатор, высокочастотные трансформаторы тока, дифференциальный датчик и UHF датчик.	Кабели электропередачи ЭМ** Т* ОЭГ***
2	**Химический** **Преимущества**:**1)** хорошая регистрация сигналов ЧР в лабораторной среде; 2) высокая чувствительность. **Недостатки:**1) уровень растворенного газа в масле не связен с конкретным типом повреждения; 2) неопределенность, из-за	Газовый хроматограф и датчик измерения озона	Т* ЭМ**

	отсутствия известной взаимосвязи между уровнем глюкозы и степенью разрушения изоляции.		
3	**Акустический** **Преимущества:** 1) обладает помехоустойчивостью при онлайн-измерение; 2) возможность определения местоположений ЧР с помощью установки датчиков в нескольких местах. **Недостатки:** 1) низкая чувствительность; 2) восприимчивость к ЭМП..	Пьезоэлектрический датчик	Изоляторы, силовые, трансформаторы ОЭГ***
4	**Оптический** **Преимущества**: 1) Для обнаружения ЧР можно использовать широкий диапазон химических и физических параметров; 3) маленький размер и легкий вес; 4) высокочастотный чувствительность; **Недостатки:** риск ложных срабатываний при неблагоприятных условиях (пыль, влажность и д.)	Волоконный интерферометр (Маха-Цендера) Интерферометры (Фабри-Перо)	Т* ЭМ** ОЭГ***

*Т – Трансформаторы, **ЭМ – Электрические машины, ***ОЭГ – Оборудование с элегазовой изоляцией.

Электрический метод [30] требует контакта измерительных приборов с объектом контроля, но возможность получения комплекса характеристик, позволяющих всесторонне оценить свойства ЧР с определением их количественных значений, сделала этот метод весьма привлекательным и доступным. Высокая чувствительность метода позволила начать обширные исследования и достичь успехов в создании высоконадежных электроизоляционных конструкций. Метод чувствителен к разным родам помех и требует применения комплекса мер по отстройке от них, например,

использования не коронирующих соединений (шин), специальных фильтров, экранирования, аппаратных средств и математических методов обработки результатов с помощью программного обеспечения.

Именно высокая эффективность электрического метода регистрации частичных разрядов при диагностике электрической изоляции высоковольтного оборудования в условиях его эксплуатации явилась причиной возросшего его применения. Во-первых, применение этого метода, обладающего высокой чувствительностью, позволяет выявлять образование ЧР в дефектных местах на ранних стадиях [31, 32]. Во-вторых, характеристики ЧР позволяют производить многостороннюю оценку свойств дефектов и характера процесса ЧР. В-третьих, метод позволяет определять, как интегральные свойства характеристик ЧР, представляющих собой множество разрядов, так и свойства единичных разрядов. В-четвертых, метод позволяет безынерционно отражать явления разрядов в изоляции.

1.3. Регистрация и оценка частичных разрядов электрическим методом

Контактный электрический метод измерения частичных разрядов (ЧР) в электрооборудовании (кабели, трансформаторы, ГИС) основан на регистрации высокочастотных импульсов тока, возникающих при пробое дефектов изоляции. Схемы используют емкостные (HF, UHF датчики) или индуктивные (трансформаторы тока) датчики, устанавливаемые на заземляющие проводники или экраны оборудования.

Единственным количественным методом оценки частичных разрядов является электрический метод.

При применении данного метода измеряются:

– кажущийся частичный заряд (амплитуда ЧР);

– напряжение возникновения (фазовый угол).

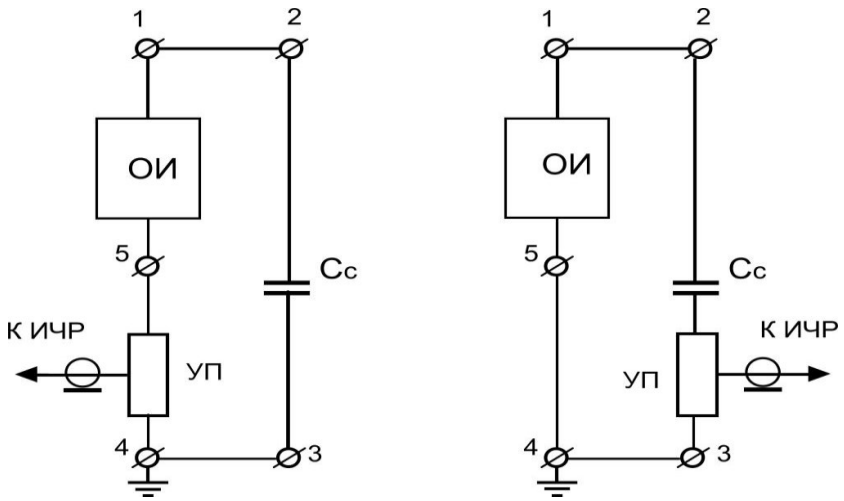
- частота следования (число ЧР за единицу времени):

- вычисленные из первых трёх – средний ток, энергия одиночного ЧР, мощность разрядов (суммарная энергия ЧР за единицу времени, фактор повторения, длительность первого периода и др.

Обычно, для измерения ЧР электрическим методом используются две основные схемы [33-37]:

а – измерительное устройство присоединяются через соединительный конденсатор C_c к высоковольтному электроду изоляции, как показано на рис. 1.9, б;

б – измерительное устройство присоединяются к датчику, которым обычно является высокочастотный трансформатор тока (ТТ), включаемый со стороны земли в цепь изоляция – земля, как показано на рис.1.7, а.



а) б)

Рис. 1.7 Схемы регистрации ЧР: ОИ – объект испытания:
C_c – соединительный конденсатор; УП – устройство присоединения;
ИЧР – измеритель ЧР [31]

В ряде случаев в лабораторных условиях в схеме (рис. 1.7, а) вместо высокочастотного ТТ используют параллельное соединение активного сопротивления $R_д$ и ёмкости $C_д$ [40,41].

Обычно характеристики частичных разрядов достаточно хорошо коррелируются с размерами дефектов, т.е. позволяют определять степень

дефектности изоляционной конструкции. В отдельных случаях качество изоляции может быть определено по какой-либо одной наиболее показательной характеристике, причем для различных изоляционных конструкций эти характеристики могут быть разными. В большинстве случаев наиболее объективная оценка качества изделия может быть произведена путем измерения совокупности характеристик частичных разрядов [6].

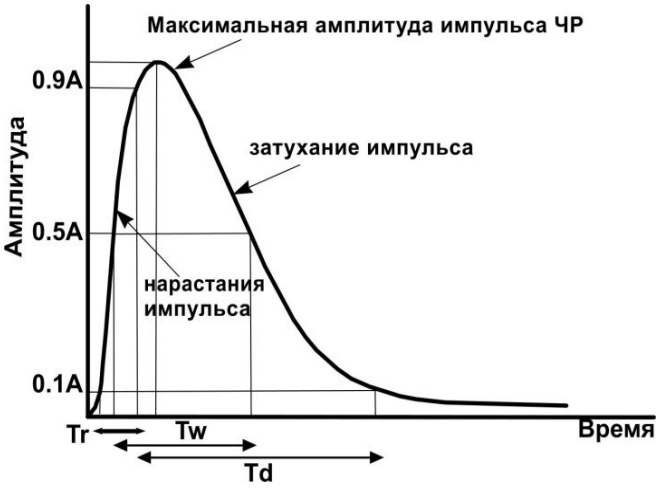
Важными характеристиками также являются:

Напряжение возникновения частичных разрядов (U_j); напряжение погасания частичных разрядов (U_e); момент времени появления импульса (f, мс), или фазовый угол появления импульса ЧР (φ_i-градусы электрические) — значение интервала времени от нуля предшествующей волны до момента образования импульса ЧР в периоде воздействующего на изоляцию переменного напряжения, или угол между нулем предшествующей положительной полуволны и импульсом ЧР; временной интервал одного цикла измерения ($t_{1ц}$, с), или число периодов воздействующего напряжения ($n_{1ц}$), — промежуток времени непрерывного измерения ЧР, выраженный в секундах или в числе периодов воздействующего напряжения;

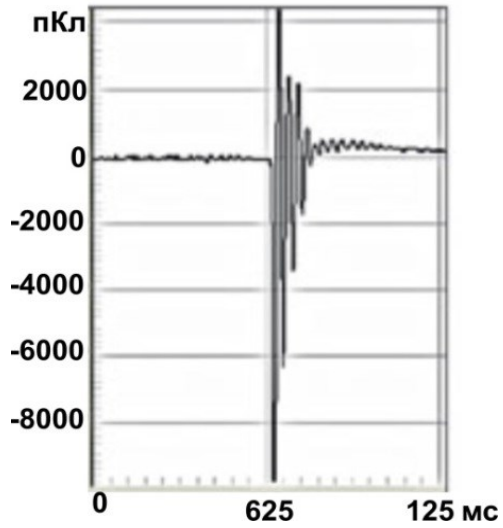
Строго говоря, для описания всех характеристик ЧР достаточно знать значения кажущегося заряда и его фазу, то есть временное положение измеренного заряда в периоде воздействующего напряжения. Остальные характеристики, за исключением U_i и U_e, определяются расчетным путем [91].

Все имеющиеся в мире стандарты по измерению и анализу частичных разрядов определяют некоторый набор первичных и «интегральных» величин, которые могут непосредственно измеряться или же рассчитываться во время проведения исследований состояния изоляции. Все инструкции по обработке сигналов стандартов по частичным разрядам, описывающие их характеристики, не объясняют способ или правило определения основных параметров (q - величина кажущегося заряда, f - частота импульса частичного

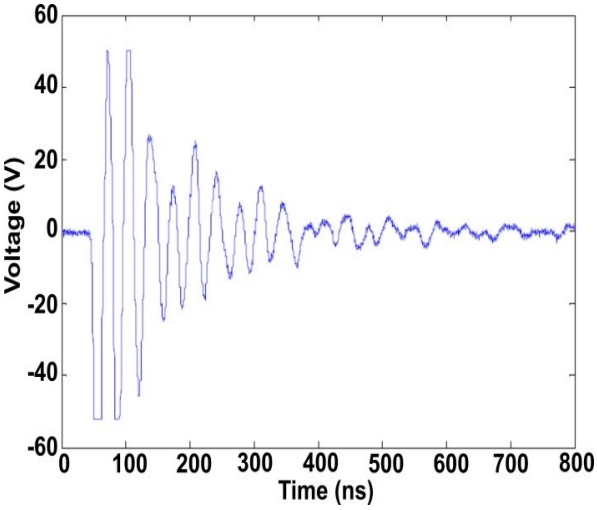
разряда и *T*— длительность импульса частичного разряда), характеризующие ЧР. На рис 1.8 [44] представлены различные формы наблюдаемых одиночных ЧР и их характеристики.



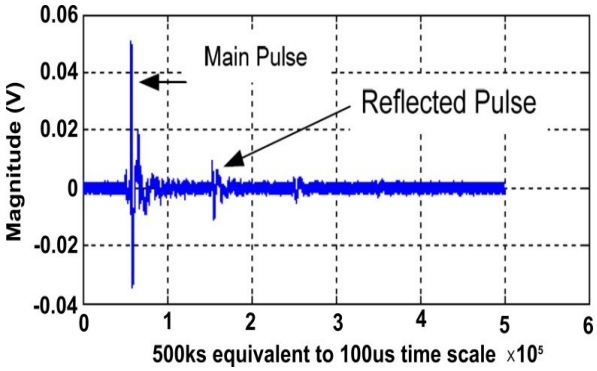
а)



б)



в)



г)

Рис. 1.8 Основные параметры единичного частичного разряда (а) при моделировании и в экспериментах (б) [28], (в) [31] и (г) [30]

На рис. 1.8, а изображён одиночный ЧР с апериодической формой и различающейся крутизной переднего (подъём напряжения) и заднего (спад) фронтов. На рис. 1.8, в изображён одиночный ЧР с колебательной формой. Затухание амплитуды сигнала отличается от затухающего переходного

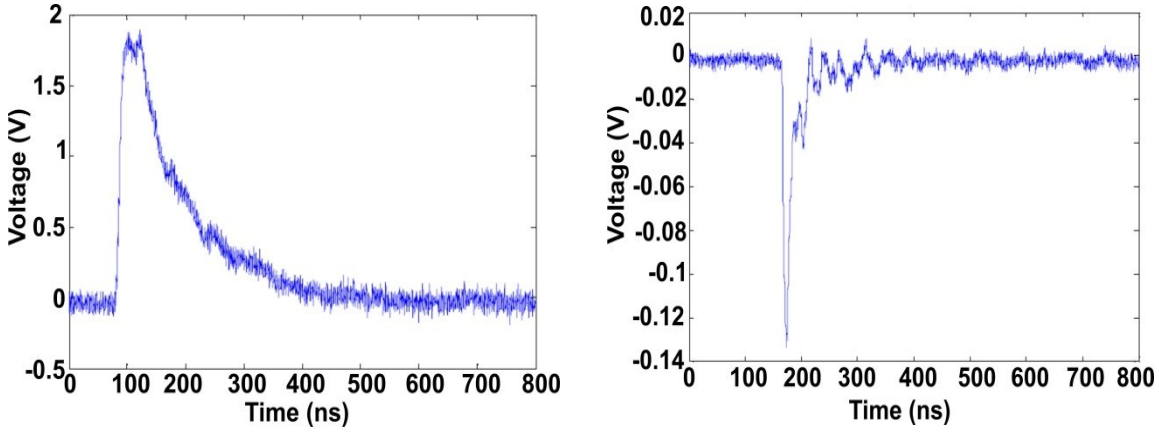
процесса тем, что время между соседними максимумами (период колебаний в переходном процессе) не является постоянным, а амплитуды убывают нелинейно. Нелинейность убывания амплитуд при ЧР в указанных экспериментах не связана в с малой частотой преобразования в аналого-цифровых преобразователях. В обычном переходном процессе амплитуда 1го экстремума является самой большой и близка к удвоенной величине броска напряжения. При измерениях ЧР встречаются случаи [28, 31], когда амплитуда первого экстремума в несколько раз меньше 2-го.

Обычно бросок напряжения при ЧР определяют по величине 1го экстремума, если он имеет наибольшую амплитуду. Если имеются экстремумы с большей амплитудой, то что принимать за величину броска напряжения при ЧР из которого находится кажущийся заряд становится не понятно. Различные авторы [28-30] предлагают разные методики: величину самого большого экстремума колебательного процесса, среднее по модулю первых двух или трёх. Этот вопрос в настоящее время не имеет непротиворечивого решения. Эта неопределённость является весьма существенным упущением при определении характеристик ЧР, что приводит к неопределённости основного понятия – величины кажущегося заряда при ЧР, возможной неправильной оценке состояния изоляции и затрудняет сопоставление результатов работ разных авторов на изоляционных конструкциях различных аппаратов высокого напряжения.

В работе [44], например, учитывают только первый пик в высокочастотном колебательном сигнале, а все остальные пики и колебания в высокочастотном сигнале частичного разряда относят к параметрам среды, окружающей зону дефекта в изоляции. Конкретная причина возникновения колебания не приводится, что характерно для большинства работ по ЧР, а объяснение колебаний за счет перераспределения энергии частичного разряда вокруг зоны дефекта в окружающей изоляции кажется неубедительным.

Кроме неопределённости в методике определении основной характеристики ЧР – амплитуды, существует также неясность в полярности

ЧР. В модели многослойной изоляции [18,44, 36,37], в рамках которой в настоящий момент времени производится интерпретация результатов измерения ЧР, изоляция рассматривается в виде множества ёмкостей параллельно-последовательно включенных между собой. Упрощенная форма модели представлена на рис. 1.3. Любой ЧР (пробой изоляции) можно свести к «закоротке» некой ёмкости, что приводит, как показано выше, к увеличению общей ёмкости и снижению амплитуды напряжения на объекте исследования при любой полярности питающего напряжения. При положительном полупериоде промышленной частоты полярность ЧР должно быть отрицательна, а при отрицательном полупериоде – положительна. Сигнал ЧР, согласно модели, всегда должен быть направлен «внутрь» синусоиды питающего напряжения. При измерениях ЧР на реальных объектах [29, 31-33, 38,39] наблюдаются и другие типы сигналов: положительные в положительном полупериоде синусоиды и отрицательные в отрицательном. На рис. 1.9 показаны два сигнала ЧР в положительном полупериоде синусоиды. Сигнал типа (рис. 1.9, а) не описывается в модели изоляции, сигнал типа (рис. 1.9, б) соответствует модели. Во многих измерительных устройствах как отечественного, так и зарубежного производства сигналы типа (рис. 1.9, а) отсеиваются на аппаратном уровне и исключаются из дальнейшего анализа.



а) б)

Рис. 1.9. Сигналы ЧР в положительном полупериоде синусоиды 50 Гц

К сожалению, в современных международных стандартах по измерению и интерпретации сигналов от ЧР не упомянута полярность ЧР и однозначное отношение к этой характеристике. Это приводит к тому, что существуют различные мнения авторов [44,40-43,16,17], которые вообще выводят из рассмотрения импульсы, которые напрямую не объясняются моделью многослойной изоляции. Некоторые мнения таковы:

– учитывают полярность самого первого амплитудного пика в высокочастотном сигнале ЧР с периодической формой,

– учитывают полярность самого максимального пика, имеющегося в регистрируемом сигнале,

– большинство авторов считают, что на положительной полуволне питающего напряжения истинные импульсы частичных разрядов должны иметь отрицательную полярность, а на отрицательной полуволне - положительную. Как уже отмечалось, это обусловлено особенностями возникновения частичных разрядов. Сигналы другой полярности считаются шумом, который нужно подавлять. Такая неопределённость и отбрасывание части ЧР «несоответствующей полярности» может исказить результат проведённой диагностики [41].

1.3.1. Анализ изменения интенсивности ЧР в процессе эксплуатации оборудования

На рис.1.10 приведена типовая кривая изменения интенсивности ЧР в процессе длительной работы и старения изоляции высоковольтного оборудования. Кривая справедлива для большинства высоковольтного оборудования. Точные характеристики кривой зависит от типов и марок оборудования, а также условий эксплуатации [69-73].

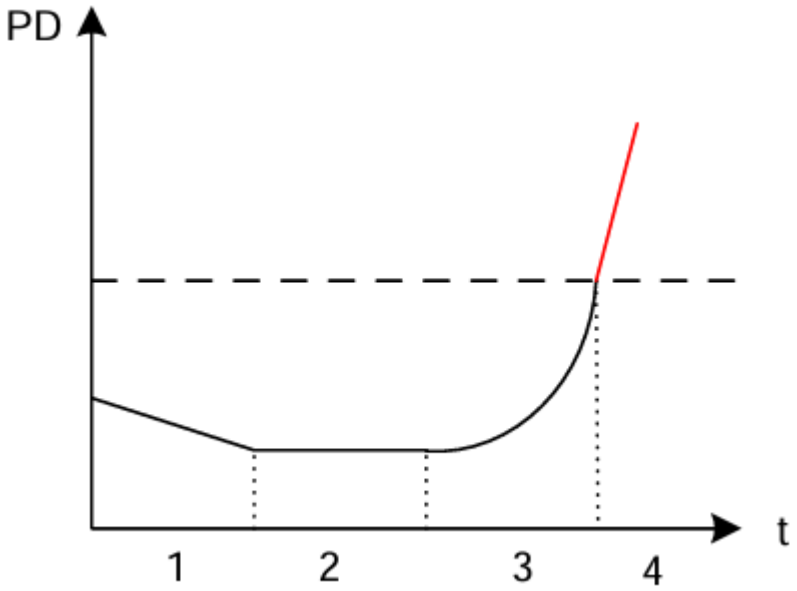


Рис. 1.10. Изменение интенсивности ЧР в процессе работы высоковольтного оборудования

На этапе 1 жизни изоляции, после ее изготовления, принимаются все меры для того, чтобы улучшить состояние изоляции. На этом этапе может проводиться дополнительная сушка изоляции, очистка, устранение мелких дефектов.

Этап 2 является основным для качественно изготовленного и эксплуатируемого высоковольтного оборудования, в идеале он имеет максимальную длительность. В течение этого времени уровень ЧР невелик и практически не изменяется. Измерения ЧР совмещаются с проводимыми регламентными и ремонтными работами.

Этап 3 характеризуется возникновением в изоляции дефектов в начальных стадиях развития, вызывается процессами старения или механическими повреждениями верхних слоев изоляции. Наблюдается устойчивая тенденция в росте интенсивности ЧР. Интервалы времени между проведением измерений ЧР существенно сокращаются. Со временем дефекты изоляции начинают развиваться сильнее.

Этап 4 начинается в тот момент времени, когда интенсивность ЧР начинает превышать допустимое значение. Практически всегда, при

непринятии должных мер, данный этап заканчивается пробоем изоляции и аварией. Перед выявлением тенденций в изменении интенсивности ЧР во времени необходимо убедиться, что эти изменения не связаны с режимом работы высоковольтного оборудования. Для этого необходимо попытаться выявить связь параметров разрядов с внешними факторами, значения которых необходимо фиксировать при каждом проведенном измерении [74-76].

Важными являются следующие факторы:

– влажность и температура окружающей среды;

– характеристики теплоносителя в системах охлаждения генераторов. Использование водорода вместо воздуха резко снижает интенсивность ЧР;

– значительные измерения напряжение питающей сети в рабочих диапазонах может повлиять на уровень ЧР;

– рабочая температура статора электрических машин;

– нагрузка контролируемого оборудования. Связь, как правило, определяется внутренним нагревом изоляции.

1.3.2. Определения мест возникновения дефектов изоляции

Для поиска места возникновения дефектов в кабельных линиях используется метод рефлектометрии под рабочим напряжением, в котором в качестве тестирующего импульса используется импульс ЧР, возникающий в зоне дефекта изоляции. В составе прибора ВЧ имеется модуль регистрации формы импульсов ЧР, который позволяет локализовать места возникновения дефектов в изоляции. В месте наличия дефекта кабельной линии возникает частичный разряд, импульс от которого распространяется по кабельной линии в обе стороны, в направлении концевых разделок кабельной линии. Прямой импульс регистрируется прибором ВЧ. Противоположный импульс отразится, и отраженный импульс, меньшей амплитуды, будет зарегистрирован измерительным прибором с задержкой времени. На рис.1.11

показано использование в методе рефлектометрии импульсов ЧР от дефекта, являющегося источником ЧР.



Рис. 1.11. Использование импульсов ЧР для поиска места дефекта в кабельной линии

Для диагностики места возникновения дефекта используется временное запаздывание второго (отраженного) импульса относительно первичного импульса. Количественно это время соответствует затратам «отражённого» импульса на движение от места возникновения дефекта до противоположного конца кабеля и возвращению обратно до места дефекта. Движение от зоны дефекта к месту установки датчика у каждого импульса занимает одинаковое время, т. е. не изменяет время запаздывания. Скорость движения электромагнитной волны в кабельной линии различна у кабелей различной марки по причине диэлектрических и конструкционных отличий кабельных линий. При одинаковом времени запаздывания прихода «второго импульса», место расположения дефекта в кабельных линиях может изменяться, в зависимости от скорости движения импульса. Реальная рефлектограмма будет отлична от идеальной, приведенной на рис. 1.11. На сигналы от дефекта накладываются отражения от соединений, муфт. Для устранения влияния помех при первичной калибровке, рекомендуется записать опорную рефлектограмму, снятую классическим методом

рефлектометрии. По этой рефлектограмме можно определить скорость распространения импульсов в кабеле и место расположения муфт. В процессе эксплуатации, при возникновении реальных ЧР, запускается рефлектометр, который сопоставляет картины распределения импульсов. Для подавления случайных помех в кабеле, измерительный прибор ВЧ выбирает в качестве места дефекта наиболее повторяющееся значение [77-81]. Общая длина анализируемого участка кабеля 6 км.

1.3.3. Анализа влияния места возникновения дефекта на распределение частичных разрядов, относительно синусоиды питающего напряжения

В [56-57] для полного анализа влияния места возникновения дефекта на распределение частичных разрядов рассмотрены три наиболее общих случая, соответствующих трём возможным местам возникновения дефекта внутри высоковольтной изоляции:

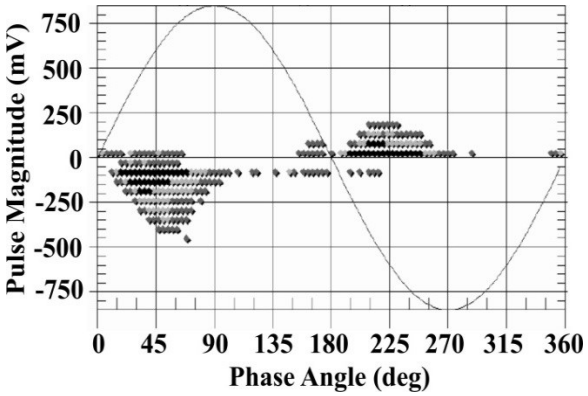
– ближе к заземлённому электроду, при этом авторы работ считают, что число ЧР в положительном полупериоде больше чем в отрицательном полупериоде (рис. 1.12, а), и это является диагностическим признаком;

- в середине слоя изоляции, при этом число ЧР в положительном полупериоде и в отрицательном полупериоде почти одинаковые (рис. 1.12, б);

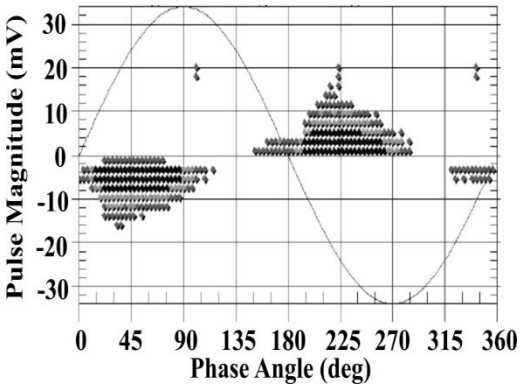
- вблизи высоковольтного электрода, при этом число ЧР в отрицательном полупериоде большее чем в положительном полупериоде (рис. 1.12, в).

В работах [47-49], а также в [46], к сожалению, не объясняется, на каких физических законах и принципах, это правило основано. Это кажется довольно странным, поскольку такие утверждения без подтверждения экспериментальными результатами, встречаются во многих работах. Вообще, с полярностью ЧР и фазой возникновения ЧР много неподтверждённых экспериментом утверждений. Автор концепции при личной переписке сообщил, что такое правило можно вывести из теории коронного разряда.

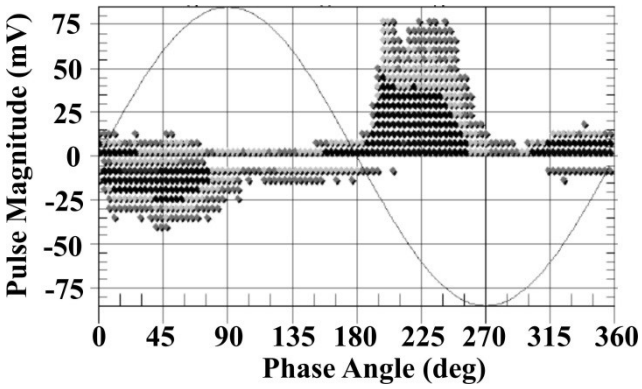
Действительно, в электродной системе «игла-плоскость», можно получить подобное соотношение. Однако, при ЧР в дефектах изоляции, мы имеем дело с барьерными разрядами в фактически в однородном поле, где такое простое правило применять нельзя и требуется более детальное рассмотрение подобного вопроса. В диссертации частично рассмотрен этот случай физики барьерных разрядов [78].



а)



б)



в)

Рис. 1.12. Влияния места возникновения дефекта на распределение частичных разрядов, относительно синусоиды питающего напряжения. а) – ЧР > +ЧР; б) –ЧР = +Чр; в) –ЧР. < +ЧР

1.3.4. Моделирование частичных разрядов в изоляции

Исследование характеристик сигналов от частичных разрядов ЧР, возникающих в изоляции высоковольтного оборудования, для оценки степени

ее деградации и изучения процессов развития ЧР и влияющие параметры на его поведение и возникновение, требует углубленного анализа физических процессов формирования этих импульсов. Скоротечность и процессов, связанных с ЧР (длительность искры составляет единицы наносекунд), предопределила использование разных моделей как математических, так и компьютерных (физико- математических), которые позволяют изучить отдельные параметры ЧР, от которых зависят процессы развития возникновения ЧР в высоковольтной изоляции.

В работе [58] разработана математическая модель, который позволяет провести расчет тока в теле диэлектрика при разрядных процессах и длительности импульса при ЧР. Предполагается, что дефект представляется в виде, плоского газового включения, расположенного параллельно плоскости электродов, а ЧР происходят в направлении, перпендикулярном этой плоскости. Система изоляции с дефектом изображена в виде двухмерной сетки, в каждой ячейке которой расположено комплексное сопротивление Z = 1/ Y. Считая, что за пределами газового включения диэлектрик однороден и изотропен, можно определить параметр Z. Процесс разряда моделируется подключением к емкости Со разрядного сопротивления, которое может быть, как линейным, так и нелинейным. На рис. 1.8.а представлен фрагмент сеточной модели с указанием амплитуд токов в миллиамперах и их направлений в каждой ячейке при разряде. Место расположения включения в центральной области диэлектрика обозначено перекрестием.

Основные результаты, которые описывают в этой модели, перемещение включения ЧР из центральной области по направлению к электроду приводит к увеличению амплитуды разрядного тока. Шестикратное возрастание амплитуды тока наблюдается при расположении включения непосредственно на поверхности электрода (рис. 1.13). Модель позволяет рассчитать количество и длительность импульсов тока при ЧР, проанализировать их изменение при различных соотношениях $U_п/U_з$.

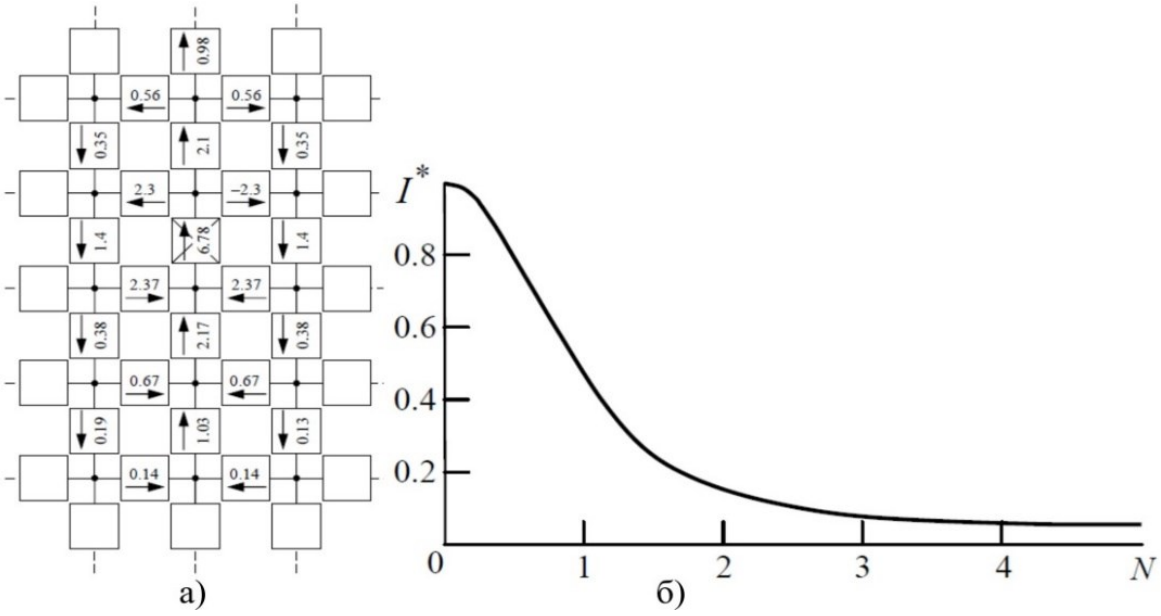


Рис. 1.13. Сеточная модель: а) фрагмент сеточной модели с указанием амплитуд токов в миллиамперах и их направлений в каждой ячейке, б) график изменения относительного значения тока *I* в теле диэлектрика в зависимости от расстояния от включения по направлению к электроду [58]

К недостаткам рассмотренной модели, которые ставят под сомнение обоснованность выводов, относится статический характер распределения токов, в то время процессы ЧР протекают за интервалы времени наносекундного диапазона, что требует введения в модель индуктивностей тех же связей между ячейками. Кроме этого, в работе [58] не описана и не учитывается форма и размер газового включения, хотя напряженность электрического поля, которая во многом и определяет характеристики ЧР, зависит от формы и размеров включения.

В работе [59-64] разработана полуэмпирическая модель, которая позволяет прогнозировать остаточный срок службы диэлектрика по анализу периодических замеров интенсивности частичных разрядов. Результаты данного исследовании основаны на формуле, описывающей зависимость мощности частичных разрядов от геометрических размеров включения:

$$P(\delta) = \mathrm{A} \cdot \left[\frac{\delta^3}{\ln(p\delta)+12.8}\right], \qquad (1.13)$$

где $A = 4 \cdot 10^5$ Вт/м^3; δ – размер включения вдоль силовых линий электрического поля; p – давление во включении (атм.).

Это формула предсказывает быстрый рост мощности частичных разрядов во включении с увеличением его геометрических размеров, что подтверждается экспериментально при измерении ЧР в образцах при термическом старении. На основании результатов данной работы [61] можно определить зависимость интенсивности разрядов от размеров газовых включений в диэлектрике.

В работе [62, 63] разработана электрическая схема для моделирования в программной среде MATLAB Simulink измерения ЧР в твердом изоляционном материале с цилиндрическим дефектом. Схема приведена на рис. 1.14. Дефект расположен в центре моделируемого образца изоляции, который находится в однородном электрическом поле. В этой работе для того, чтобы описывать процессы развития частичных разрядов применяются такие характеристики, как максимальная величина ЧР, количество ЧР, распределение ЧР по амплитудам, частотам и фазам, частота импульса определённых величин.

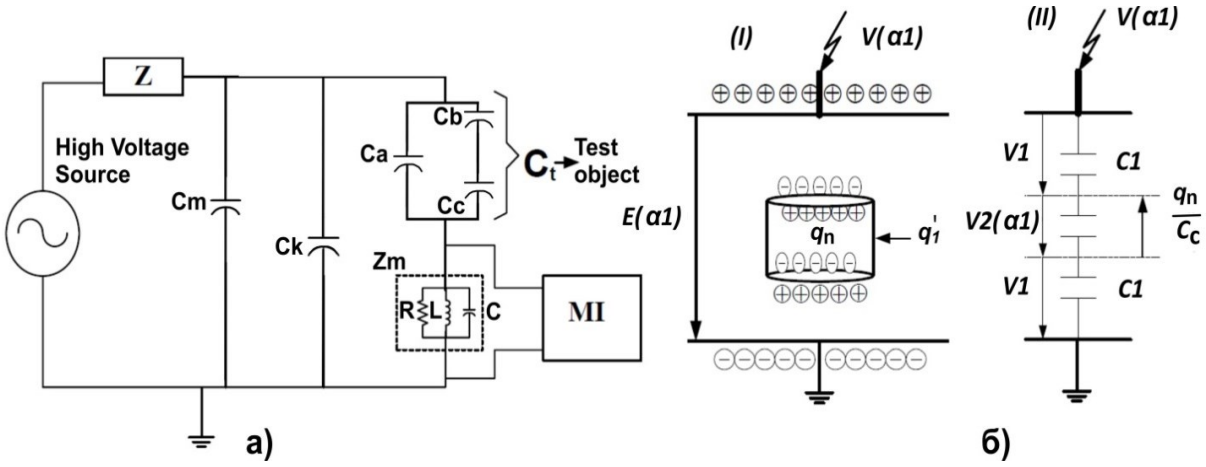


Рис. 1.14. Модель твердой изоляции с дефектом

Обозначения на рис.1.14: а) эквивалентная схема: *Vs* – высоковольтный трансформатор, *Z* – блок фильтров, $C_м$ – измерительный конденсатор высокого напряжения, C_t – объект испытания с моделью цилиндрической полости, *Ск* – разделительный конденсатор, Zm – датчик С для измерения

частичных разрядов, MI – прибор измерения, б) принципиальная схема пустот (газовое включение) в виде (I) параллельной пластины и (II) – параллельных емкостей.

В работе установлена зависимость величины кажущего заряда от геометрической конфигурации пустоты (рис. 1.15). При увеличении размера цилиндрического дефекта увеличивается и величины кажущего заряда. Аналогичные результаты по зависимости величины кажущего заряда от геометрической конфигурации дефекта описываются авторами [65-67].

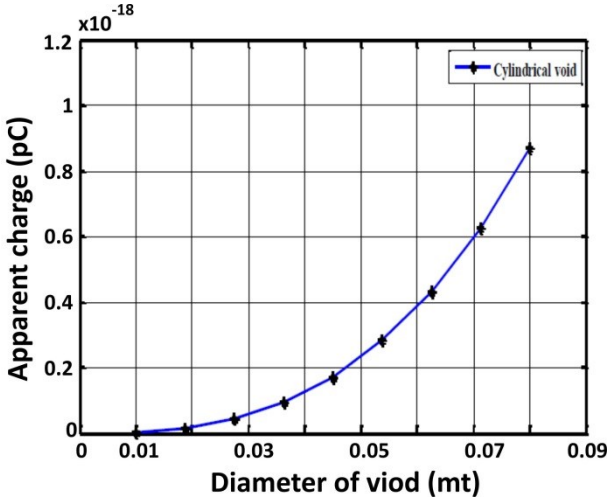


Рис. 1.15. Зависимости величины кажущего заряда от размеров дефекта

Автор работы [68] предложил свою модель изоляции с дефектом для анализа частичных разрядов. Основными элементами модели являются конденсаторы, которые представляются как нелинейные многопараметрические элементы. Процессы возникновение ЧР имитируется с помощью контролируемого источника напряжения. Предложенную модель можно построить в таких современных программных продуктах, предназначенных для анализа электрических цепей, как (Matlab Simulink, Multisim, Electronics, Workbench, Spice AS). Преимущество этой модели позволяет интегрировать основные параметры ЧР при изменениях так внутри дефекта, так и на его поверхности.

Существуют также разные модели ЧР, реализованные методом конечных элементов в программах *Comsol Multiphysics* и *ANSYS*. В таких средах осуществляется возможность мультифизического моделирования нескольких параметров, влияющих на процесс возникновения и развития ЧР. Результаты таких моделирований обычно хорошо подтверждаются экспериментальными наблюдениями.

Существуют и другие работы [82 – 90] по моделированию процессов возникновение ЧР, которые позволяют анализировать разные параметры ЧР. Основные результаты моделирования направлены на построение: 1. зависимости количество ЧР от приложенного напряжения в исследуемом объекте, 2. зависимости параметров ЧР от поверхностной проводимости дефекта в изоляции, 3. зависимости параметров ЧР от формы дефекта (сферический, цилиндрический и несимметричный), 4. интерпретации физических процессов, происходящие в дефекте, на основании измеряемых характеристик ЧР, 5. соотношения между размером дефекта, его местоположением в изоляции и закономерностью возникновения частичных разрядов, 6. влияния температуры материала и размера полости на интенсивность ЧР, 7. зависимости тока разряда от величины приложенного напряжения.

В рамках литературного обзора диссертации нет возможности детально обсудить все эти модели, следует отметить лишь важность и возможность моделирования разных процессов при возникновении ЧР. На сегодняшний день этот способ исследования природы ЧР занимают большое место в диагностике изоляции высоковольтного оборудования.

Все выше причисленные модели концентрируют внимание на моделирование процессов возникновение и развитие ЧР, но в них отсутствуют описание установления связи между характеристиками электрических разрядов в газовых дефектах изоляции, размерами дефектов и их изменением под действием разрядов. Поскольку эти параметры в значительной степени влияют на предсказательную способность метода ЧР, а

ясность отсутствует, представляется **актуальной** и важной как с теоретической, так и с практической точки зрения задачи, поставленные в диссертации. Решение этих задач и полученные результаты измерений ЧР представлены во второй и третье главе диссертации.

1.4. Выводы к главе 1

В результате анализа публикаций по диагностике изоляции методом частичных разрядов можно сделать следующие заключения:

– метод частичных разрядов широко используется для диагностики состояния изоляции высоковольтного электрооборудования во всех странах;

– метод ЧР постоянно развивается и выполнены десятки тысяч исследований ЧР в изоляции различных электротехнических устройств;

– существует различие между лабораторными характеристиками ЧР и характеристиками ЧР реальных объектов электроэнергетики;

– общепринятые способы представления результатов измерения ЧР противоречивы и не учитывают особенностей конструкций реальных объектов;

– отсутствует каталог всех возможных дефектов в различных видах оборудования с перечнем характеристик ЧР, позволяющих отличать один тип дефекта от другого.

На основании вышеизложенного цель диссертации можно определить так – повышение достоверности результатов контроля состояния изоляции высоковольтного электрооборудования методом частичных разрядов за счёт экспериментального определения характеристик ЧР одного из основных типов дефектов изоляции – газовых включений в твёрдую изоляцию.

Для достижения поставленной цели было необходимо:

– создать экспериментальную установку для измерения ЧР в газовых дефектах изоляции, в которой должны быть исключены внешние посторонние сигналы, которые могут быть приняты за сигналы ЧР;

– разработать и создать комплекс программ для расчётов электрических полей в создаваемой установке и в дефектах изоляции; определить места возможных ЧР, которые могут возникнуть из-за конструктивных особенностей установки и оценить их характеристики; устранить, по возможности, все типы ЧР за исключением ЧР в специально создаваемых газовых дефектах изоляции;

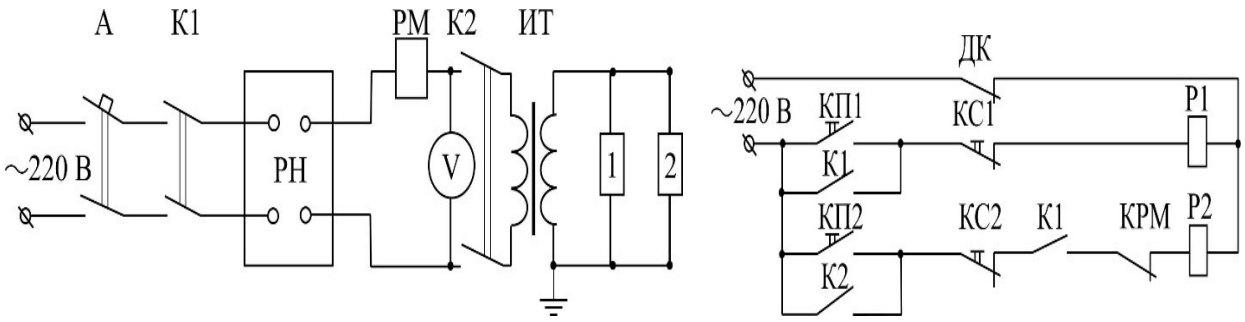
– провести измерения ЧР в газовых дефектах различных размеровэлектрическим контактным способом; определить их основные характеристики и связь с размерами дефектов;

– на основании полученных экспериментальных данных разработать практические рекомендации по обработке результатов экспериментов в реальных объектах энергетики.

ГЛАВА 2. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ «ПЛОСКИЙ КОНДЕНСАТОР»

2.1. Конструкция испытательной установки

Для решения задач, поставленных в диссертации, была создана экспериментальная установка с испытательной ячейкой с формой плоского конденсатора. Общая схема и схема управления установки представлена на рис. 2.1, а, б.



а) б)



в)

Рис. 2.1. Схема установки измерения ЧР: а – общая; б – схема управления; в – ИЯ – диск-диск (ИЯДД)

На рисунке используются следующие условные обозначения [4, 5]:

а) А – общий рубильник; два магнитных пускателя представлены контактами (К) и катушками (Р) с соответствующими номерами); РН – регулятор напряжения; РМ – реле максимального тока; ИТ – испытательный трансформатор; 1 – объект испытаний – измерительная ячейка с образцами изоляции; 2 –универсальный делитель напряжения УДН 200000/100.

б) КП1, КС1, К1 и Р1 – кнопки «пуск», «стоп», контакты и катушка магнитного пускателя; КП2, КС2, К2 и Р2 – кнопки «пуск», «стоп», контакты и катушка магнитного пускателя; КРМ – контакт реле максимального тока; ДК – дверной контакт.

Измерения ЧР в этой установке проводилось в следующей последовательности:

– включение общего питания установки; при включении рубильника А на распределительном щите лаборатории высоких напряжений при замкнутом контакте на двери заземлённого ограждения установки ДК подготовлена цепь для подачи напряжения на регулятор напряжения РН;

– нажатие кнопки «пуск» (КП1) магнитного пускателя 1; цепь управления замыкается и ток, протекающий по катушке Р1, притягивает якорь пускателя, а контакты К1 замыкаются, блокируя кнопку пуск КП1 и подготавливая цепь для подачи напряжения на испытательный трансформатор;

– проверка напряжения на выходе с РН; после подачи напряжения на РН по показаниям вольтметра (V) следует установить напряжение на выходе регулятора равным нулю;

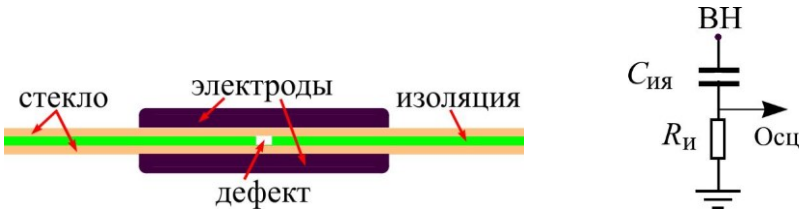
– нажатие кнопки «пуск» (КП2) магнитного пускателя 2 и установка требуемого для проведения наблюдений ЧР напряжения;

– проведение измерений;

– снижение высокого напряжения до нуля и отключение установки.

В качестве источника высокого напряжения использовались испытательные установки АИИ-70 с регулировкой напряжения автотрансформатором и АИД-70 с тиристорной схемой регулирования.

Объектом испытаний являлась изоляция с созданными дефектами заданных размеров, помещённая в измерительную ячейку (ИЯ). Конструкция измерительной ячейка и схема регистрации ЧР представлены на рис. 2.2.



а) б)

Рис. 2.2. Объект испытаний: а – конструкция ИЯ; б – схема измерения ЧР

ИЯ имеет форму плоского конденсатора со стальными электродами с формой диска диаметром 25, 40, 50 и 60 мм и толщиной 6 мм. Испытуемая изоляция имела форму диска диаметром 180 мм и соосно размещалась между стеклянными дисками толщиной h1 = 0,5 мм с диаметрами, равными диаметру изоляции. Толщина изоляции изменялась от 0,3 мм до 1,1 мм. В центре изоляции вырезалось сквозное отверстие цилиндрической формы с диаметром 2 мм. В некоторых экспериментах на металлические электроды надевались вплотную диэлектрические кольца с внешним радиусом кольца на 10 мм большим, чем радиус электрода. В некоторых экспериментах на поверхность стеклянных дисков и внутреннюю поверхность диэлектрических колец наносился тонкий слой трансформаторного масла.

Кроме основного места возникновения ЧР – дефекта в изоляции – в ИЯ «диск-диск», как показали эксперименты, имеются и другие места, в которых возникнут ЧР. Такие дополнительные разряды усложняют общую картину ЧР и затрудняют выделение ЧР, возникающих в дефекте изоляции. Возможные места возникновения ЧР в ИЯ «диск–диск» были определены в результате расчёта электрического поля в ИЯ. Такие расчёты приведены в следующем

разделе главы. Для уменьшения воздействия внешних импульсных сигналов на измерительные цепи, ИЯ помещались в центр заземлённого металлического бокса с формой куба с ребром 1 м. Для ввода высокого напряжения в бокс был изготовлен проходной конденсатор, качество которого определялось по отсутствию сигналов ЧР при напряжениях до 40 кВ. Вывод напряжения с датчика ЧР на осциллограф проводился по экранированному коаксиальному кабелю через байонетный разъём. Для защиты входных цепей осциллографа параллельно датчику ЧР (измерительное сопротивление $R_и$ на рис. 2.2, б) устанавливался искровой разрядник с напряжением срабатывания 90 В. Поскольку разрядные напряжения зависят от относительной плотности воздуха, при каждом проведении измерений регистрировались температура и давление в лаборатории. Полученные в ходе экспериментов значения напряжения и напряжённости возникновения ЧР пересчитывались к нормальным условиям (температура 20 °С и давление 760 мм.рт.ст.). Все измерения проводились в лаборатории техники высоких напряжений кафедры «Электрические станции имени В.К. Шибанова» в ФГБОУ ВО «КГЭУ».

2.2. Расчёты электрического поля в ИЯ «диск-диск»

Расчеты электрических полей в ИЯ с электродами диск-диск (ИЯДД) выполнены методом конечных элементов в программе *Comsol Multiphysics* 6.0. Так как ИЯДД имеет осевую симметрию, при расчётах электрического поля (ЭП) можно перейти от декартовой системы координат *x–y–z* к цилиндрической *r*–φ–*z*. При такой симметрии зависимости параметров ЭП от координаты φ не будет и они могут быть получены поворотом вокруг оси симметрии на угол φ. Это означает, что расчёт поля в пространстве можно заменить более быстрым расчётом в плоскости *r–z* для координат r>0. Такая симметрия задачи соответствует симметрии 2*D* – *axial* в программе.

Расчёты ЭП производились в рамках законов электростатического поля. Это объясняется тем, что в расчётах определялись характеристики поля, при котором ЧР происходит. ЭП, изменяющееся с частотой 50 Гц, является практически постоянным при длительностях передних фронтов импульсов ЧР ~ 10 нс. Исследование процессов развития разряда и зависимости от времени процессов возникновения и исчезновения внутреннего объёмного заряда в задачи диссертации не входило.

Графическая часть модели ИЯДД (рис. 2.2а) состоит из 7 областей (доменов):

– 2 домена электродов;

– 2 домена пластин стекла;

– 1 домен изоляции:

– 1 домен дефекта;

– 1 домен воздуха, окружающего ИЯДД (на рис. 2.2, а он не обозначен).

В электростатическом приближении для каждого из доменов в узле свойств материала необходимо и достаточно задать только относительную диэлектрическую проницаемость среды домена (ε). Металлические части либо заменяются их границами (вырезаются из расчётной области), либо для них задаётся большая величина ε, например, ε=1000000.

Во всех доменах должно выполняться условие сохранения заряда (*Charge Conservation*), а относительная диэлектрическая проницаемость ε (*relative permittivity*) задаваться в свойствах материала домена.

Уравнения электростатики на всех границах доменов должны быть заданы (граничные условия):

– границы на оси симметрии – *axial symmetry*;

– на границах: дефект–изоляция, изоляция–стекло, изоляция–воздух, стекло–воздух и зона расчёта задаются уравнением $\boldsymbol{n} \cdot (\boldsymbol{D}_2 - \boldsymbol{D}_1)$ (*Surface Charge Density*) с плотностью зарядов $\rho_s = 0$, что означает отсутствие на этих границах свободных зарядов, т. е. равенство входящих в участок границы и выходящих из него потоков электрической индукции;

– на границах электродов задаётся напряжение – *Electric Potential*, если один из электродов заземлён, то это соответствует условию *Ground.*

После задания всех граничных условий пространство расчёта разбивается на сетку (*Mesh*) из отдельных элементов, число которых ограничено (конечно). Их форму, размеры и последовательность построения сетки отдельных областей, границ и доменов можно задавать вручную (*User–controlled mesh*) или по встроенному в программу алгоритму (*Physics–controlled mesh*). От качества созданной сетки зависит результат расчёта, поскольку напряжённость ЭП в пределах одного элемента сетки постоянна, т. е. при крупной сетке происходит усреднение параметров ЭП по большему пространству, чем при мелкой. При расчетах ЭП следует уменьшать размеры элементов сетки (дробить сетку) до тех пор, пока не будут получены одинаковые значения напряжённости при разном масштабе сетки. Сам расчёт ЭП в методе конечных элементов сводится к нахождению вариационным методом такой конфигурации поля, при которой его энергия в области расчёта при заданных граничных условиях минимальна. Расчёт (*Study*) запускается командой вычислить *(compute, F*8). В результате расчёта в каждом узле сетки становится известен потенциал, а в пределах элемента сетки – напряжённость ЭП. Последующая часть расчёта состоит в извлечении нужной информации и/или вычислении на основе расчёта различных производных величин.

2.2.1. Электрическое поле в дефекте изоляции

Частичные разряды (ЧР) в газовом включении возникают в момент достижения напряжённости поля во включении пробивного значения. Величина пробивной напряжённости зависит от размеров и форм дефекта. Для определения величины напряженности поля, при котором возникает ЧР, необходимо знать соотношение между напряженностью поля в дефекте и средней напряжённостью, которое зависит от размера дефекта. Это

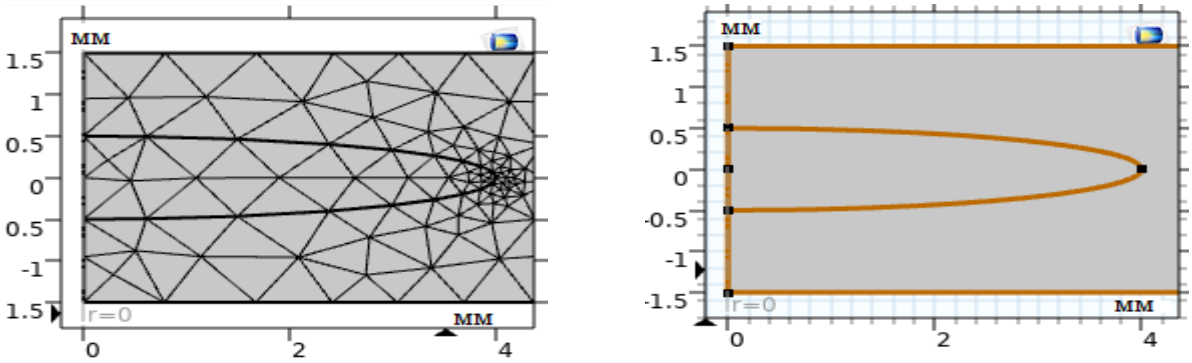
соотношение можно назвать коэффициентом напряжённости поля внутри дефекта по отношению к средней напряженности в изоляции.

Основной задачей расчёта ЭП являлось определение коэффициента неоднородности поля ($K_н$) внутри дефекта изоляции. Коэффициентом неоднородности поля называется отношение максимальной напряжённости (E_{max}) к средней ($E_{ср}$) в изоляции. Средняя напряжённость находится простым делением напряжения (U) на наименьшее расстояние между электродами (d).

$$К_н = \frac{E_{max}}{E_{ср}} = \frac{E_{max}}{U} \cdot d \qquad (2.1)$$

Задачу можно разбить на две части: расчёта $K_н$ в изоляции и расчёта $K_н$ в изоляции ячейки «плоский конденсатор». Первая часть расчётов позволяет ответить на некоторые вопросы наблюдения ЧР в любом типе изоляции. Вторая часть – на объяснение наблюдавшихся ЧР в экспериментах с ячейкой «плоский конденсатор».

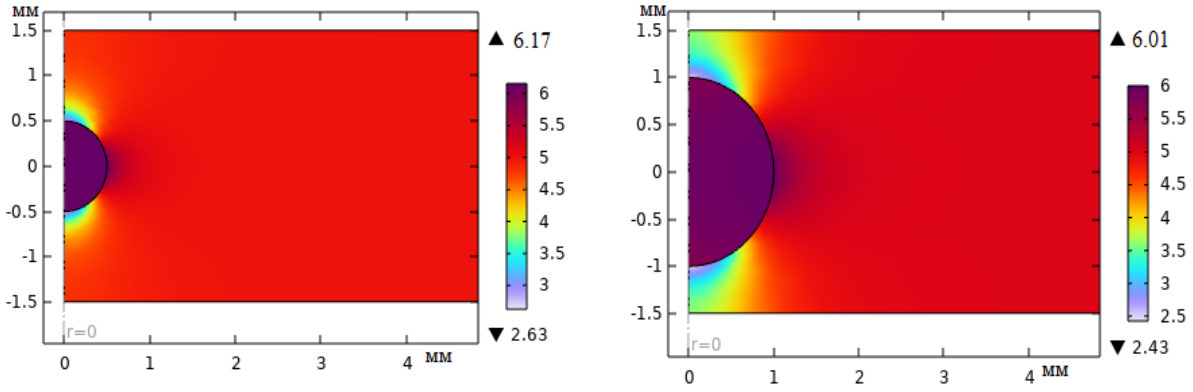
Моделировании в первой части расчётов однородного поля с дефектами было выполнено для газовых включений с формой фигуры вращения (шар и сфероид). Диэлектрическая постоянная изоляции при моделировании принималась равной 2,35, что соответствует выбору изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ, XLPE). На рис. 2.3 показан фрагмент модели изоляции с дефектом.



а) б)

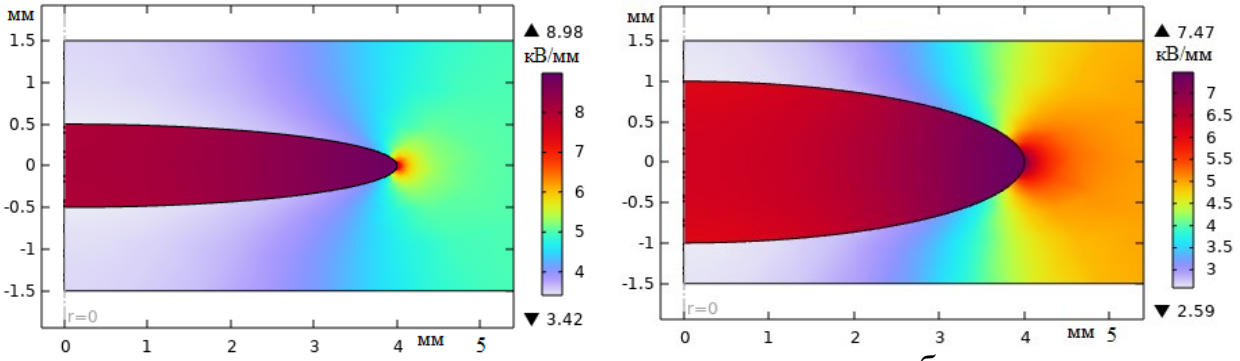
Рис. 2.3. Фрагмент модели изоляции с дефектом сфероид: а – разбиение пространства на отдельные области (сетка); б – границы областей

Результаты компьютерного моделирования различных по размеру дефектов с формой шара и сфероида показаны на рис. 2.4 и 2.5.



а б

Рис. 2.4. Напряженность электрического поля (кВ/мм) в изоляции с газовым дефектом с формой шар с размерами: а – 1 мм и б – 2 мм



а б

Рис. 2.5. Напряженность ЭП (кв/мм) в изоляции с газовым включением сфероид размерами вдоль поля: а – 1 мм; б – 2 мм

Электрическое поле в изоляции вдали от места повреждения однородно, то есть в нормальной части изолятора напряжение одинаково во всех его точках. ЭП в шаре является однородным, а напряжённость превышает среднюю в соответствие с формулой (1.9). В зоне изоляции выше и ниже дефекта напряженность ЭП поля уменьшается за счёт электрической индукции, а вдоль оси r – возрастает до напряжённости внутри дефекта на границе. Граница изменения напряжённости ЭП в изоляции за счёт присутствия дефекта находится на расстоянии радиуса дефекта от его границ.

В областях с напряжённостью ЭП, превышающих среднюю, увеличивается скорость деградация изоляции.

Если в шаре ЭП однородно, то в сфероиде поле не является однородным. Наибольшая напряжённость наблюдается в зонах с наибольшей кривизной поверхности. Напряжённость ЭП, при которой возникает разряд зависит от расстояния между электродами. Можно сказать, что в газовом дефекте изоляции такими электродами являются границы дефекта. Чем меньше расстояние, тем большая напряжённость поля требуется для возникновения самостоятельного разряда. Поскольку в шаре напряжённость одинакова, а расстояние наибольшее вдоль оси симметрии, то условие самостоятельного разряда выполняется прежде всего в точках на оси симметрии. В сфероиде ответ на вопрос о месте зарождения лавин ЧР не так однозначен

В таблицах 2.1 и 2.2 представлены результаты расчетов E_z-компоненты напряженности ЭП в изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ) с сфероидными и сферическими дефектами различных размеров. Длина дефекта вдоль поля в изоляции во всех расчетах принималась равной от 0,25 мм до 1,5мм. Напряжение, приложенное к высоковольтному электроду, составляет 15 кВ, расстояние между электродами равно 2,5 и 3 мм.

Результаты расчета z-компоненты напряженности электрического поля (кВ/мм) в изоляции с дефектом сфероид с разными полуосями a/b, с b = 4 мм приведены в таблице 2.1.

Результаты расчёта напряжённости электрического поля (z-компоненты) в изоляции с дефектом типа шар с различными радиусами (R) приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.1. Результаты расчета z-компоненты напряженности электрического поля (кВ/мм) в изоляции с дефектом сфероид

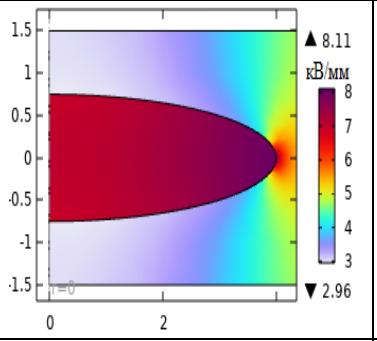
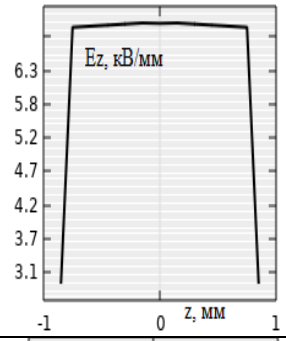
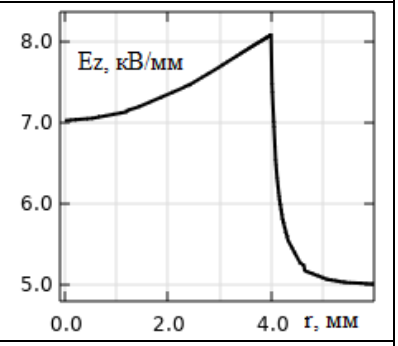
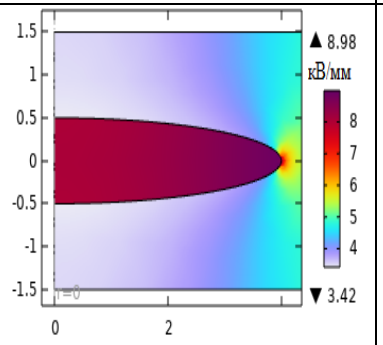
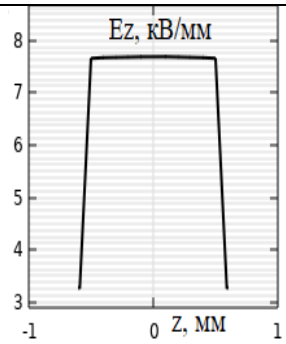
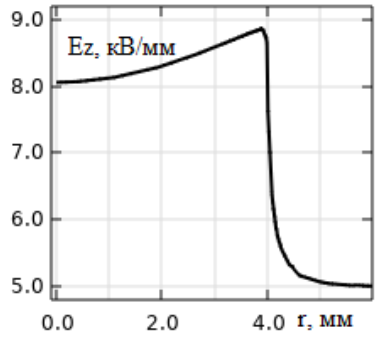
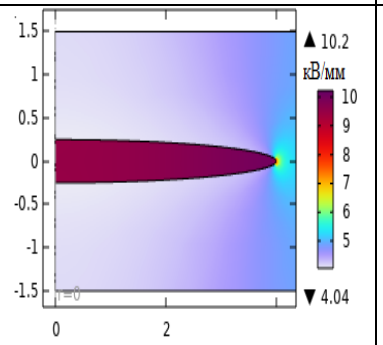
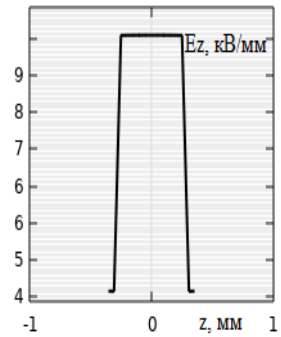
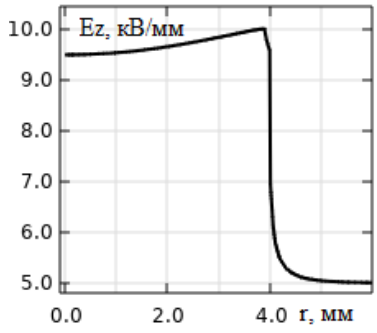
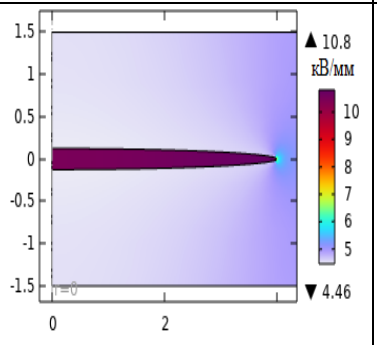
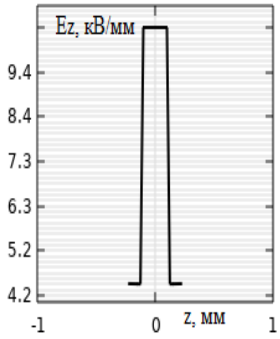
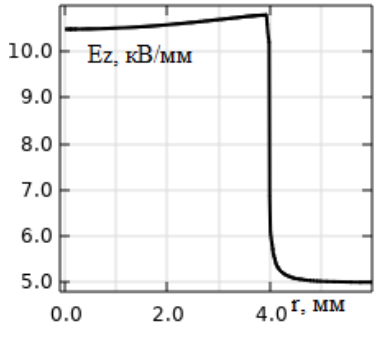
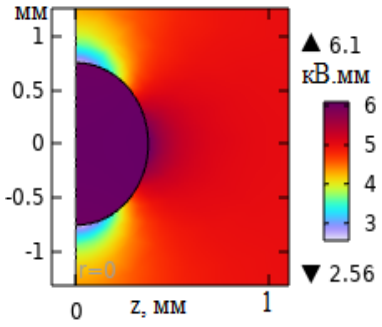
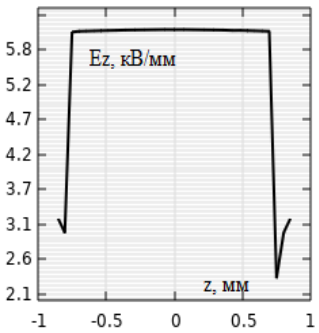
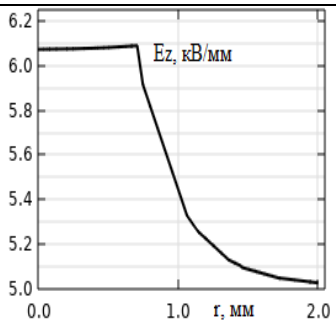
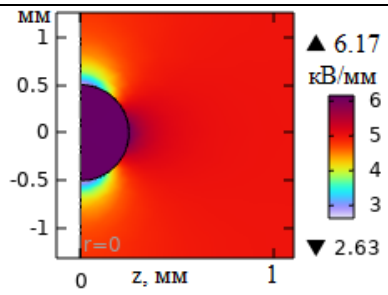
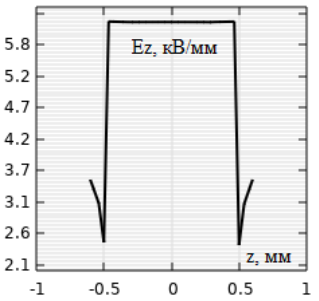
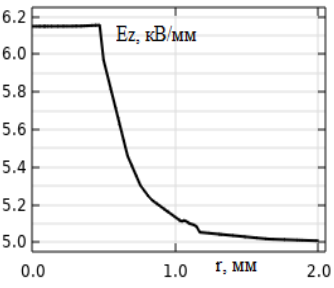
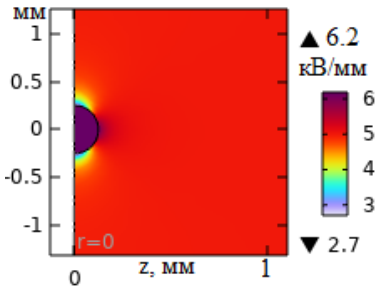
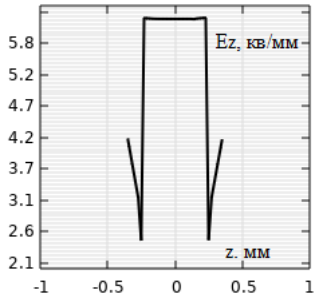
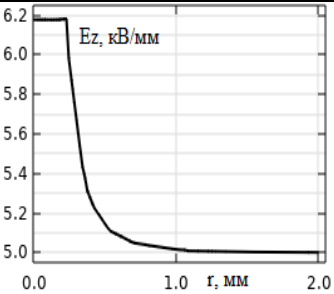
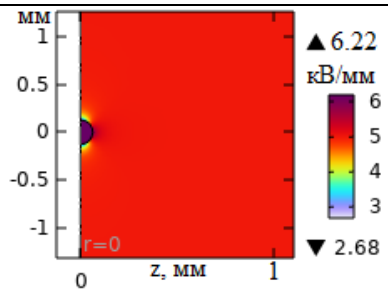
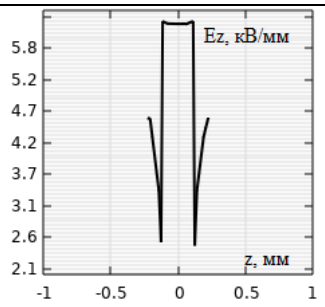
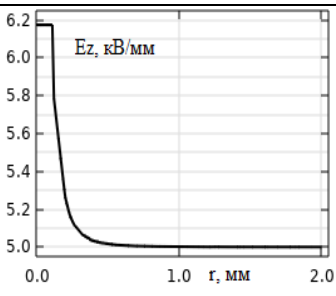
$\frac{a}{b}$ мм	Распределение напряжённости в изоляции, кВ/мм	Зависимость E_z от координаты z при r=0, кВ/мм	Зависимость E_z от координаты r при z=0, кВ/мм
$\frac{1,5}{4}$			
$\frac{1}{4}$			
$\frac{0,5}{4}$			
$\frac{0,25}{4}$			

Таблица 2.2. Результаты расчёта напряжённости электрического поля с *z*-компоненты в изоляции с дефектом типа шар

R, мм	Распределение напряжённости ЭП в изоляции с дефектом, кВ/мм	Зависимость E_z от координаты *z* при *r*=0, кВ/мм	Зависимость E_z от координаты *r* при z=0, кВ/мм
1,5			
1			
0,5			
0,25			

Из рисунков таблиц 2.1 и 2.2 можно сделать несколько выводов:

– дефект вносит существенные изменения в распределение напряжённости ЭП в изоляции образца;

– зона изменений заканчивается от границ дефекта на расстоянии порядка радиуса кривизны: имеются зоны с большей и меньшей напряжённостью чем средняя;

– напряжённость ЭП внутри дефекта больше средней напряжённости в изоляции и зависит от формы дефекта;

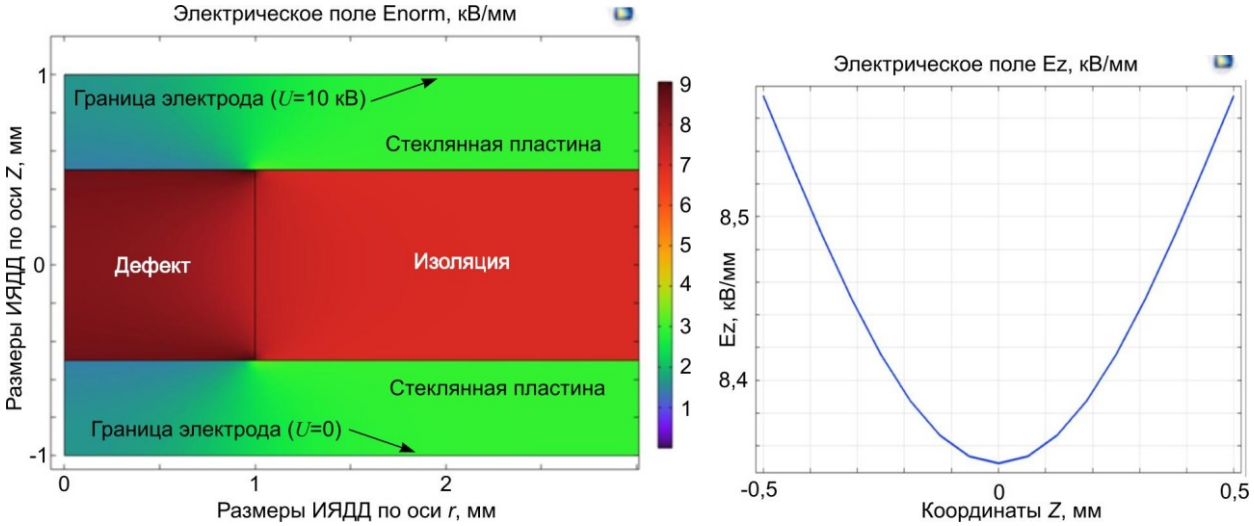
– ЭП внутри сферического дефекта однородно и не зависит от расстояния до края изоляции (электродов), если оно больше радиуса шара;

– коэффициент неоднородности поля равен вычисленному по (1.9);

– в сфероиде напряжённость (E_z) зависит от расстояния от центра вдоль большой полуоси, возрастая при подходе к границе дефекта.

2.2.2. Расчёт ЭП в ИЯДД с образцом изоляции

При проведении измерений ЧР в ИЯДД дефект имел форму цилиндра. Диэлектриками верхней и нижней поверхностей являлось стекло, а боковой – СПЭ. Напряжённость ЭП и зависимость Ez компоненты вдоль оси симметрии в дефекте при толщине изоляции 1 мм, толщине стеклянных дисков 0,5 мм и разности потенциалов между дисками 10 кВ в окрестности дефекта представлена на рис. 2.6.



а) б)

Рис. 2.6. ЭП в ИЯДД: а – распределение Enorn; б – *Ez* в дефекте вдоль оси симметрии

Для определения напряженности внутри дефекта по средней напряжённости необходимо вычислить коэффициент неоднородности напряжённости поля. На рис. 2.7 представлена вычисленная зависимость коэффициента неоднородности (Кн) поля внутри каверны дефекта от размера дефекта вдоль поля при значениях ε=6 – для стекла и ε=2,5 – для СПЭ.

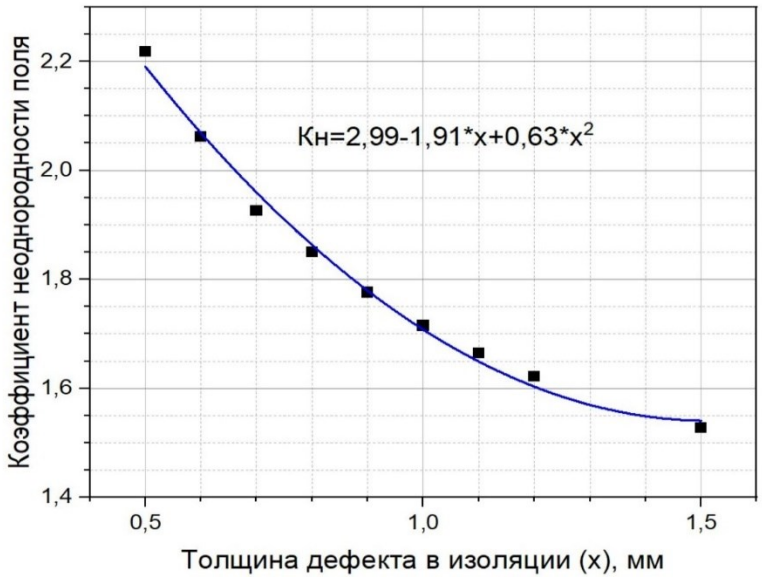
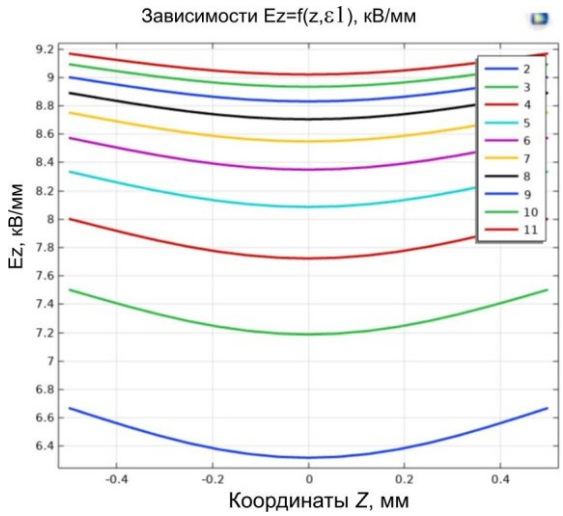
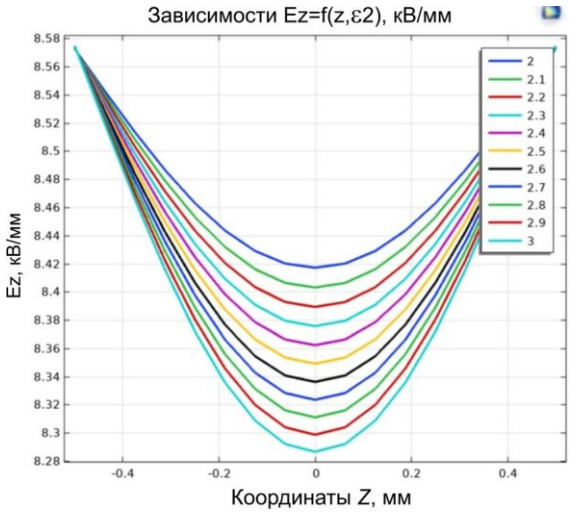


Рис. 2.7. Зависимость Кн в каверне дефекта изоляции в ИЯДД от размера вдоль поля

Величины ε при расчётах принимались в соответствии с документами на изделия. Торговые фирмы не очень внимательно относятся к таким техническим деталям как величина относительной диэлектрической проницаемости материала. Для определения возможной ошибки в Кн из-за неопределённости ε были рассчитаны электрические поля при их различных значениях. Результаты расчётов представлены на рис. 2.8.



а)



б)

Рис. 2.8. Зависимость Ez от свойств материала: а – ε1 – ε стекла; б – ε2 – ε СПЭ

Максимальная напряжённость в дефекте зависит от ε стекла. Если считать, что ε стекла в наших экспериментах может изменяться от 6 до 9, то разница максимальных напряжённостей будет равна 0,4 кВ, что при средней напряжённости поля 5 кВ/мм составит погрешность около 10 %. Влияние ε СПЭ сказывается на напряжённости в центре дефекта и не сказывается на максимальной напряжённости. При расчётах диапазон возможных величин ε СПЭ был взят со значительным превышением реальных значений. Можно сказать, что неопределённость в величине ε СПЭ не приводит к ошибке определения Кн. Возможная ошибка в определении Кн приводит к тому, что значение величины напряжения возникновения ЧР ($U_{ЧР}$), которое можно предсказать из известной величины размера дефекта вдоль поля, также может иметь погрешность 10 %.

2.2.3. Расчёт ЭП возможных мест возникновения ЧР в ИЯДД

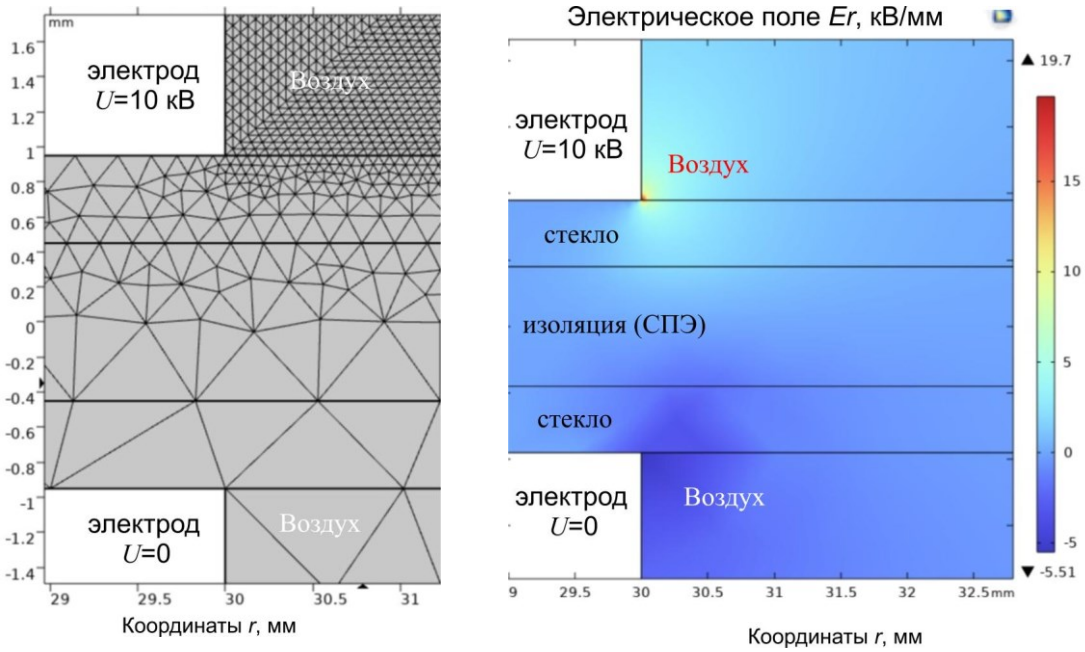
В изоляции с дефектом известных размеров можно предсказать $U_{ЧР}$, если в каверне нет большой величины остающегося объёмного заряда. По

этой величине можно рассчитать фазовый угол ЧР, т.е. построить теоретическую АФД и сравнить её с экспериментальной. Такие попытки были сделаны в данной работе и приводятся в следующем разделе этой главы. В образцах изоляции кроме предсказанных ЧР наблюдалось большое число ЧР неизвестного происхождения, которые возникали внутри ИЯДД. Для объяснения природы происхождения неизвестных ЧР были выполнены детальные расчёты мест в ИЯДД, в которых могли бы возникнуть такие разряды. В этом подразделе описываются такие расчёты.

Наиболее вероятные места возникновения ЧР это границы электродов и микроскопические полости между электродом и стеклом и между стеклом и изоляцией. При выполнении расчётов в областях с резко–неоднородным полем следует внимательно подходить к вопросу выбора размеров элементов сетки. Как упоминалось выше чем больше размер, тем на большей величине происходит усреднение напряжённости. Недостаточно малые размеры элементов приводят к заниженным значениям напряжённости и неправильно предсказывают возможность или не возможность возникновения ЧР. На рис. 2.9 представлено разное дробление сетки в области края электродов и результат расчёта ЭП.

Электродная система ИЯДД имеет плоскость симметрии с нормалью по оси z и проходящую через точку r=0. Картина ЭП на рис. 2.9, б должна быть симметрична относительно этой плоскости. Вдали от края электродов так и наблюдается и при разном масштабе элементов сетки. Вблизи границы трех областей электрод–стекло–воздух размер сетки сильно сказывается на результате расчёта. На нижнем электроде при грубой сетке напряжённость в 4 раза меньше, чем на верхнем электроде. Если сделать около нижнего электрода такую же сетку, как и у верхнего, то поле становится симметричным и напряжённости Er у краёв электродов имеют равную по модулю напряжённость, но противоположного знака.

Зависимость Er–компоненты напряжённости ЭП от расстояния до края электрода представлена на рис. 2.10.



а) б)

Рис. 2.9. Край электродов: а – сетка; б – распределение *Er* компоненты ЭП

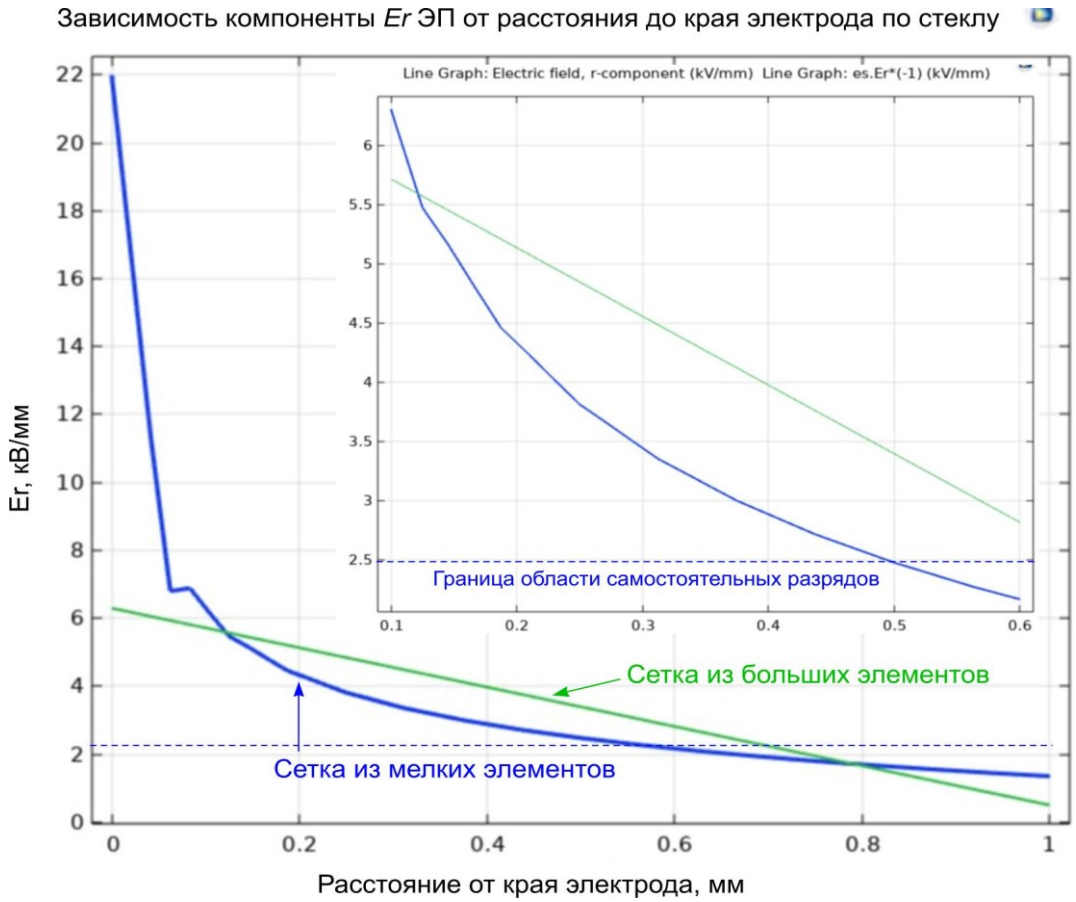
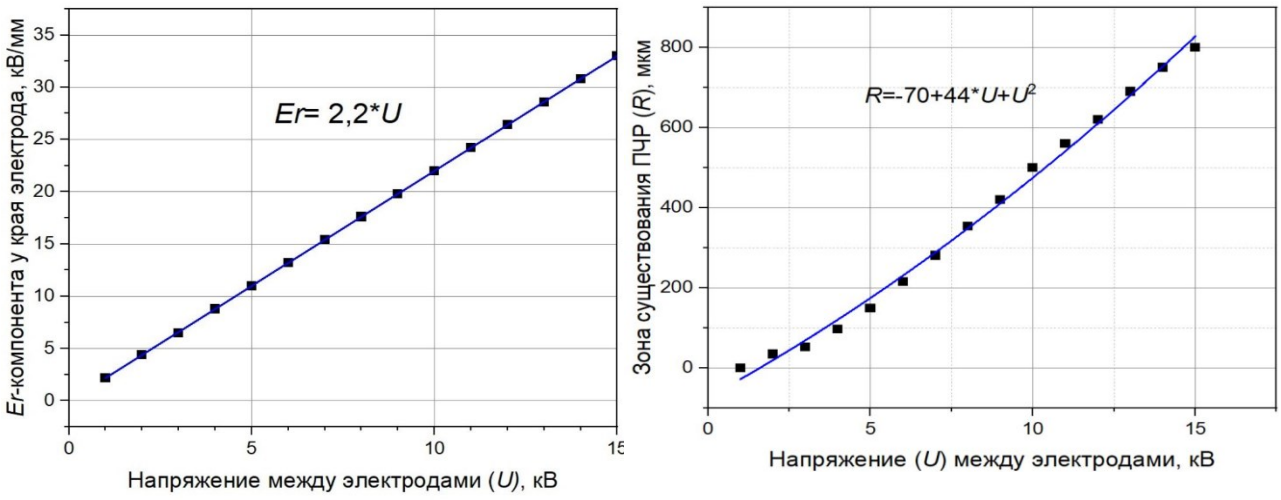


Рис. 2.10. Зависимость компоненты *Er* ЭП от расстояния до края электрода по стеклу

На расстояниях меньше 0,5–0,7 мм от края электрода по границе стекло воздух напряжённость *r*–компоненты ЭП превышает минимальную величину напряжённости, при которой при нормальных условиях могут возникнуть ЧР.

Зависимость напряжённости поля у края электрода и расстояние (зона) от электрода, при котором выполняется условие самостоятельного разряда, представлены на рис. 2.11.



а) б)

Рис. 2.11: а – *Er* у края электрода; б – зона существования ЧР

Зона существования ЧР определялась как расстояние, при котором напряжённость поля становилась больше 2,5 кВ/мм. ЧР в этой зоне развиваются в воздухе над поверхности стекла и носят название поверхностных разрядов (ПР). Таких разрядов может быть несколько за период синусоиды [2]. С повышением напряжения ПР могут происходить при разных напряжениях, т. е. при разных фазовых углах. Отличием таких ПР от ЧР в газовых дефектах изоляции является отсутствие парности разрядов. ПР в положительном периоде синусоиды может быть обнаружен только случайно в отрицательном полупериоде со сдвигом 180°. Картина распределения поля не зависела от диаметра электрода в диапазоне 25–60 мм. Ток ПР не проходит непосредственно через измерительное сопротивление. Для снижения

вероятности возникновения ЧР в зонах вблизи края электродов на каждый из электродов вплотную надевались диэлектрические кольца из полиэтилена.

Разряды в прослойках между электродами и стеклом отличаются от разрядов в дефектах тем, что размер и число таких тонких прослоек неизвестны. Минимальную толщину прослойки, в которой может возникнуть разряд, можно оценить по закону Пашена для разряда в газах. Для воздуха минимальное значение произведения давления на толщину прослойки, в которой может возникнуть электрический разряд, составляет 5 мм*торр [7]. Давление при оценке можно принят равным 1 атмосфере (760 торр). Тогда минимальная толщина получится равной 5/760=6,5 мкм. Прослойки с размерами больше 7 мкм могут возникнуть при контакте электрода и стекла.

Возможный диапазон размеров вдоль поля случайных воздушных дефектов, возникающих из-за негладкости поверхности диска и стекла находится от 7 до 100 мкм. При расстоянии менее 7 мкм ЧР не будут наблюдаться по закону Пашена, а более 0,1 мм – маловероятны, поскольку электроды имеют шлифованную поверхность. Эти расстояния можно принять за радиусы малых полуосей сфероидов из предыдущего раздела и воспользоваться построенной моделью. По расчётам ЭП для этого диапазона расстояний коэффициент меняется от 3,88 до 3,6 и для оценок возможных ЧР можно использовать единый коэффициент Кн=3,75.

Возможные дефекты из-за неплотного прилегания стекла к изоляции можно не учитывать, поскольку изоляция ровная, а конструкция ИЯДД поджималась специальными элементами для более плотного прилегания частей ячейки друг к другу.

Моделирование электрического поля в различных областях ИЯДД показало, что частичные разряды могут возникать:

- в воздухе над поверхностью стекла вблизи тройной точки металлический электрод-стекло—воздух. В этой области, частичных разрядов может быть несколько за период, в том числе во 2й и 4 четвертях синусоиды.

- в тонком зазоре стекло-электрод в воздушных и в масляных промежутках. В этой области ЧР должны наблюдаться при фазовых углах вблизи 90 и 270 градусов.

- между стеклом и изоляцией.

2.3. Измерения частичных разрядов и результаты исследования

Измерения ЧР проводились по схемам рис. 2.1 и 2.2. Перед началом измерений:

– регистрировалось давление и температура в высоковольтной лаборатории;

– выполнялось фотографирование под микроскопом с кратностью увеличения 1500х поверхности внутреннего дефекта;

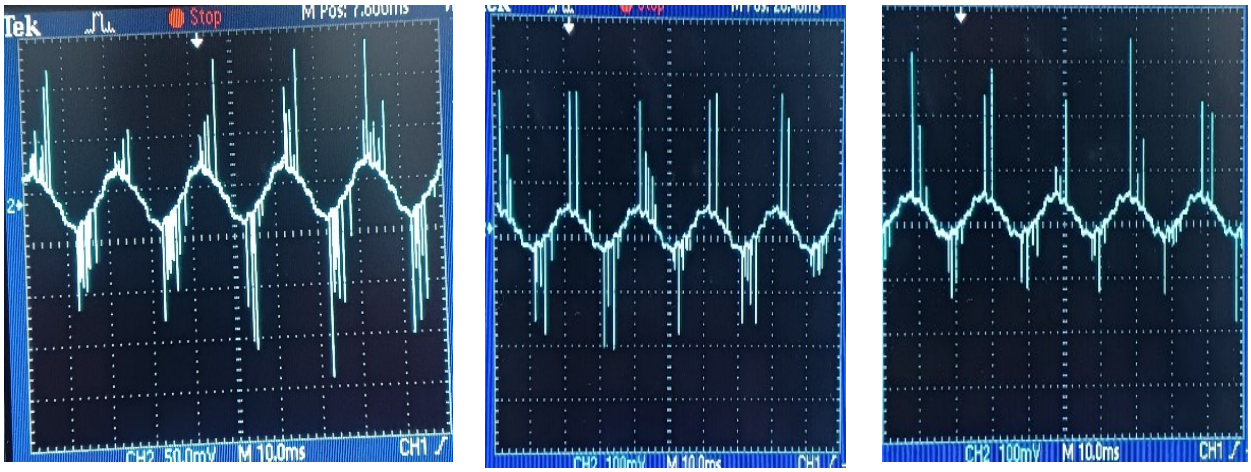
– измерялось напряжение возникновение ЧР в ячейке с образцом изоляции без дефектов и с дефектами;

– Для каждого образца изоляции с внутренним дефектом записывалось время начала и окончания воздействия ВН, а после окончания измерений производился контроль состояния поверхности дефекта (фотографирование под микроскопом).

Типичная картина наблюдаемых ЧР представлена на рис. 2.12. Выделить сигнал ЧР от внутреннего дефекта (рис. 2.12, в) от поверхностных ЧР практически достаточно сложно даже при наличии контрольной осциллограммы образца без дефекта (рис. 2.12, б) [105-111].

Напряжение с измерительного сопротивления подавалось на один из входов двухканального цифрового осциллографа TDS–2004 и с помощью программы *LabView* записывалось в память компьютера. Особенность применения осциллографа в качестве аналого–цифрового преобразователя для оцифровки аналоговых сигналов с измерительного сопротивления состояла в том, что сохранение информации в компьютере производится

отдельными участками с длиной участка в 5000 точек выборки. Это соответствует снимку экрана осциллографа.



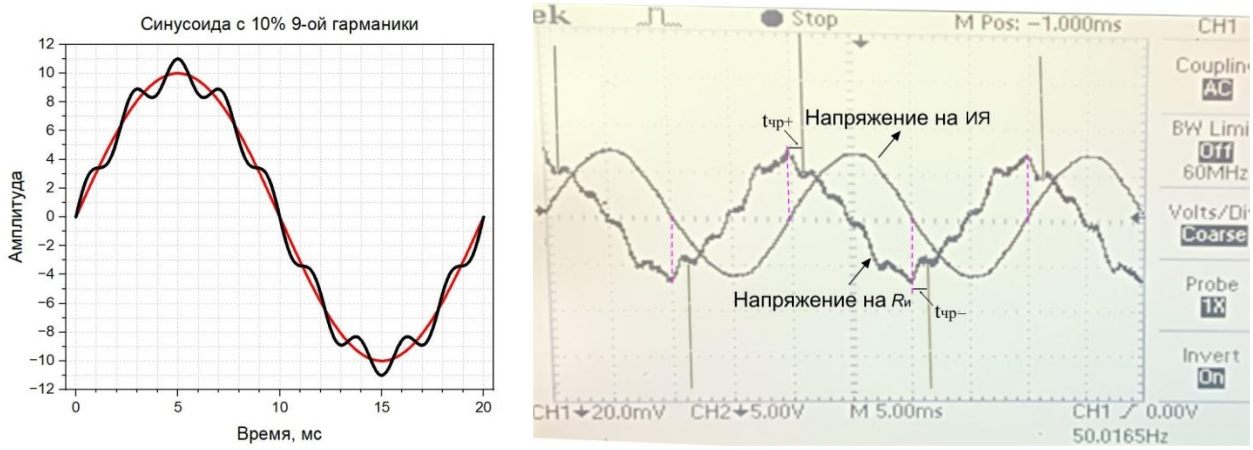
а) б) в)

Рис. 2.12. Осциллограммы ЧР: а – образец без дефекта: б – образец без дефекта, но электроды с диэлектрическим кольцом: в – образец с дефектом

Точность определения напряжения возникновения ЧР ($U_{чр}$) зависит от точности измерения интервала времени $t_{чр}$ (1.1). Для надежного измерения этого времени нужно, чтобы на одном экране (участке в 5000 выборок) находилась точка отсчёта и точка возникновения ЧР. Это условие ограничивало выбор интервала времени между отдельными выборками от 4 до 20 мкс, что соответствовало размещению на экране от 1 до 5 периодов синусоиды. Величина тока, протекающая через измерительное сопротивление, имела порядок 15 мкА. В измерительной цепи кроме основной гармоники (50 Гц) наблюдалось ~10% примеси 9–ой гармоника (450 Гц) (рис. 2.13). Некоторые экстремумы тока 9–ой гармоники совпадает экстремумами основной гармоники, что повышает точность определения их положения на шкале времени за счёт большей крутизны.

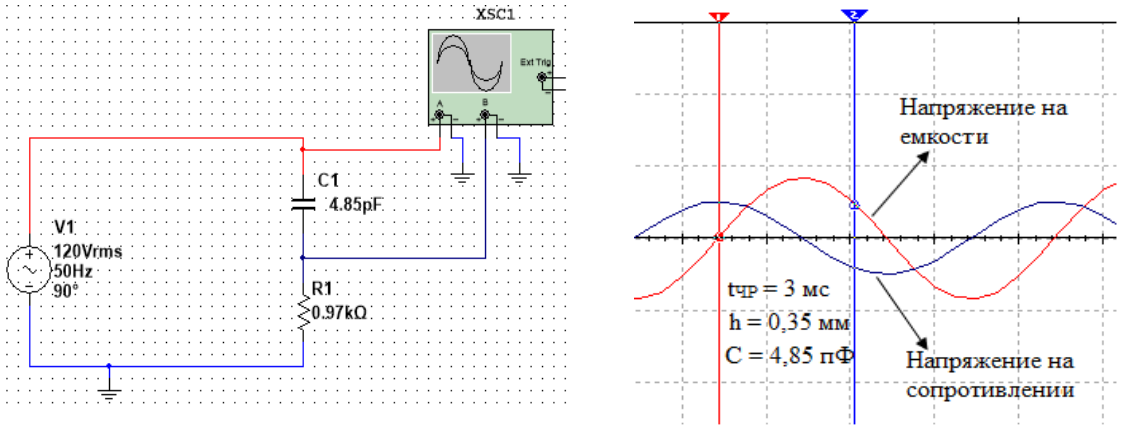
Синусоида тока через измерительное сопротивление на 90° опережает синусоиду напряжения на ёмкости $C_{ия}$ на рис. 2.2, б, что видно на рис. 2.13, б.

Это следует из основ теории цепей и подтверждено моделированием в программе *Multisim* цепи измерения ИЯДД рис. 2.14.



а б

Рис. 2.13. а – период синусоиды с частотой 50 Гц (красная линия) и синусоида 50 Гц с 10% 9–ой гармоники (черная линия); б – снимок экрана TDS–2001



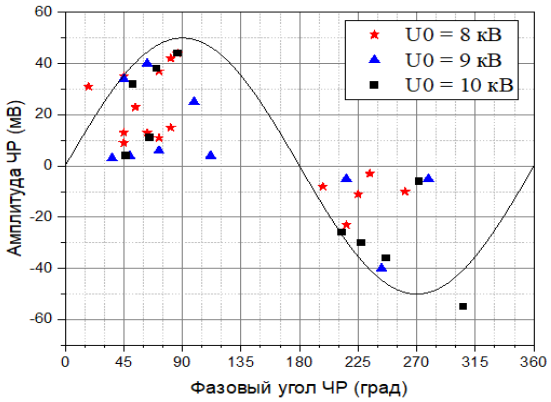
а) б)

Рис. 2.14. Схема в *Multisim*: а – схема замещения; б – синусоиды тока и напряжения

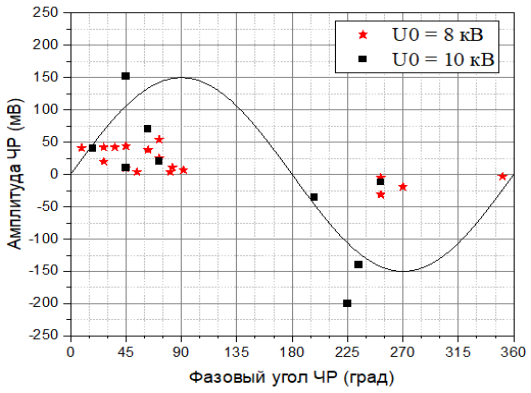
Более точные результаты $t_{чр}$ получались при ручном измерении интервала между экстремумом 9–ой гармоники на экстремуме основной синусоиды тока и началом ЧР. Цифровые снимки экрана позволяют измерять $t_{чр}$ с точностью до 100 мкс (цена деления шкалы времени составляла 20 мкс).

Такая погрешность измерения времени соответствовала погрешности измерения фазы возникновения ЧР 4°. Современные устройства измерения ЧР в программном режиме обработки данных обычно измеряют фазу ЧР с погрешностью в 5° [3]. Напряжение возникновения ЧР ($U_{чр}$) рассчитывались по (1.1). Напряжение на ИЯДД измерялось электростатическим киловольтметром С–96 и/или осциллографом, подключённым к низковольтному выводу универсального делителя напряжения УДК 200000/100 с коэффициентом деления 2000.

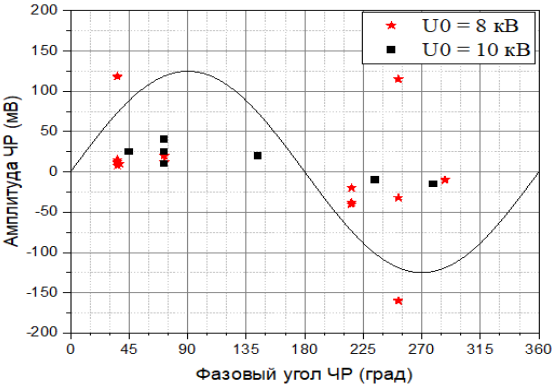
По такой методике для шести образцов изоляции из сшитого полиэтилена различной толщины с дефектом диаметром 2 мм при различных значениях приложенного к электродам напряжения были измерены времена возникновения ($t_{чр}$) и рассчитаны напряжения возникновения ЧР ($U_{чр}$). Полученные значения $U_{чр}$ умножались на относительную плотность воздуха $\delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{t_0+273}{t+273}$, где P и t – давление и температура в лаборатории в момент проведения измерений, т.е. приводились к нормальным условиям (t_0=20 °С. По измереному занчению величины амплитудного значения U_0 и приведённому к нормальным усовиям $U_{чр}$ по (1.1) определялся фазовый угол возникновения ЧР. Каждый ЧР на АФД представлен символом с на плоскости с координатами по вертикальной оси, соответствующей амплитуде наблюдаемого ЧР. Координата по горизонтальной оси соответствует фазовому углу возникновения ЧР. Результаты измерений ЧР в разных образцах в различные моменты времени при различных значениях амплитуды приложенного напряжения представлены на рис. 2.15.



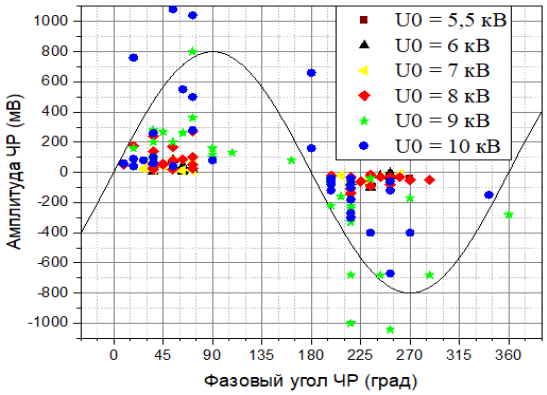
а)



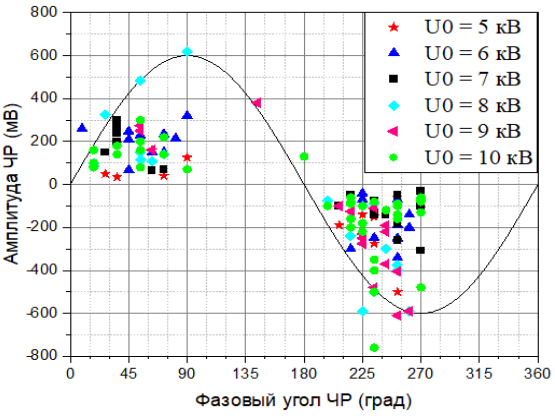
б)



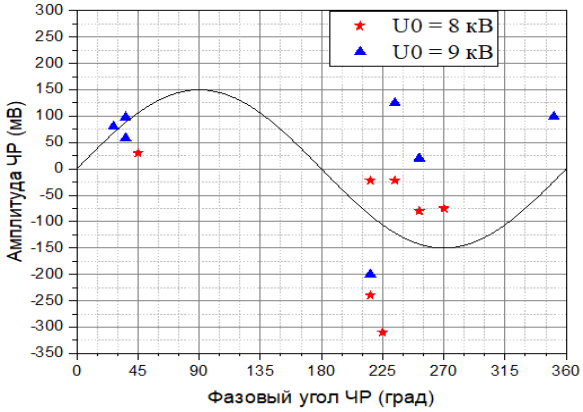
в)



г)



д)



е)

Рис. 2.15. АФД ЧР в образцах с h=: а – 0,3; б – 0,5; в – 0,6; г – 0,8; д – 0,9; е – 1,1 мм

Для оценки принадлежности ЧР на рис. 2.15 каким–либо дефектам в ИЯДД была составлена таблица 2.3 ожидаемых ЧР. В 1–ом столбце таблицы приведены размеры дефекта вдоль поля. Во 2–ом – величина напряжённости ЭП, при которой между электродами размером из 1 колонки происходит

электрический разряд [8]. В 3–ем – действующее (среднеквадратичное, *RMS*) напряжение на ИЯДД, при котором проводились измерения ЧР.

Таблица 2.3. Ожидаемые фазы возникновения ЧР от дефекта

Размер h. мм	$E_{чр}$, кВ/мм	$К_н$	*U*, кВ *RMS*	$\varphi_{чр}+$	$\varphi_{чр}-$	*Eср, кВ/мм*	*Eмакс, кВ/мм*	*U*, кВ *RMS*	ПР, fmin	Эксп. Фаза+	Эксп. Фаза-
0,3	6,25	2,74	8	15	195	8,7	23,8	5	11	17	197
			9	13	193	9,8	26,8	5.5	10	37	217
			10	12	192	10,9	29,8	6	9		
0,5	5,5	2,22	8	19	199	7,5	16,5	7	8	20	200
			10	15	195	9,4	20,7	8	7	8	200
0,6	5,25	2,06	8	21	201	7,1	14,6	9	6	32	212
			10	16	196	8,8	18,3	10	5	45	230
0,8	4,9	1,85	5,5	37	217	4,3	8,1			22	202
			6	34	214	4,7	8,8				
			7	29	209	5,5	10,3			27	207
			8	25	205	6,3	11,7			20	200
			9	22	202	7,1	13,2			20	200
			10	20	200	7,9	14,7			22	202
0,9	4,8	1,78	5	46	226	3,7	6,6			27	207
			6	37	217	4,5	8,0			45	216
			7	31	211	5,2	9,3			27	207
			8	27	207	6,0	10,6			26	216
			9	24	204	6,7	11,9				207
			10	21	201	7,4	13,3			18	216
1,1	4,5	1,66	8	30	210	5,4	8,9			45	225
			9	27	207	6,1	10,0			37	217

В 4–ом и 5–ом столбцах приводятся рассчитанные значения фаз ЧР в положительном и отрицательном полупериодах синусоиды, соответственно. Расчётная формула получается из (1.1) при замене напряжений на напряжённости: $U_{чр} \rightarrow E_{чр}$ и $U_0 \rightarrow E_{макс}$. Тогда:

$$\varphi_{чр} = \sin^{-1}\left(\frac{E_{чр}}{E_{макс}}\right), \tag{2.2}$$

$$E_{макс} = E_{ср} \cdot К_н \tag{2.3}$$

$$E_{ср} = \frac{U}{d} = \frac{U}{1+h}, \tag{2.4}$$

$$К_н(h) = 2{,}99 - 1{,}91 \cdot h + 0{,}63 \cdot h^2, \tag{2.5}$$

где $E_{чр}$– ожидаемая напряжённость ЧР из колонки 2, *U* – приложенное к ИЯДД напряжение из колонки 9, умноженное на корень из 2, *d* – расстояние

между электродами ИЯДД в мм, равное толщине двух стеклянных пластин по 0,5 мм и толщине изоляции из колонки 1, $К_н$ – коэффициент неоднородности ЭП в изоляции, рассчитанный при моделировании и представленный на рис. 2.7 ($К_н(0,3) = 2,74$).

В колонках «$\varphi_{чр}$ +» и «$\varphi_{чр}$ −» приведены ожидаемые фазовые углы ЧР при размерах дефектов из колонки «Размер h. мм» и графика на рис. 1.5.

В колонке с названием «ПР, fmin» приведены минимальные значения фазовых углов. Поверхностные частичные разряды могут наблюдаться в диапазоне от fmin до 180°- fmin в положительном полупериоде синусоиды и в диапазоне от 180°+fmin до 360°- fmin в отрицательном.

Анализ результатов измерения ЧР показывает нестабильность результатов наблюдения ЧР. В контрольном образце без газового дефекта внутри изоляции наблюдалось несколько различных типов ЧР:

1) повторяющиеся парные ЧР, которые регистрировались в каждой первой и третьей четвертях периода синусоиды со сдвигом фазы в 180°;

2) парные, но не повторяющиеся во всех периодах;

3) одиночные, наблюдающиеся в первой и третьей четвертях;

4) одиночные, наблюдающиеся во второй и четвертой четвертях, в том числе вблизи фазовых углов 0 и 180°.

Расчёты электрических полей в ИЯДД показали, что возможными местами возникновения ЧР в образце без дефекта могут быть воздушные прослойки, с размером вдоль поля до 200 мкм и области на границе электрод-стелкло-воздух в узкой области вблизи электродов. ЧР типа 1 и 2 были отнесены нами к воздушным прослойкам, а 3 и 4 к поверхностным ЧР вблизи электродов. ЧР типа 2 возниали в тех случаях, когда поверхности электродов покрывались тонуим слоем трансформаторного масла, которое наносилось, чтобы заполнить возможные воздушные пустоты между электродами и стеклом. В этих случаях на поверхности стекла после проведения измерений образоввались концентрические круги обгоревшего масла, соответствующие неровностям шлифовки поверхности электродов. В случае сухих

поверхностей контакта стекло-электрод нагара на поверхности стекла не было, а ЧР типа 2 не наблюдались.

Замена контрольного образца на образец с дефектом мало изменяла общую картину спектра ЧР. По расчётам применение плотных колец из полиэтилена надеваемых на электроды должно было снизить число поверхностных ЧР, которые по вышеприведённым признакам должны относиться к ЧР 3 и 4 типа. При практическом использовании таких колец, снижая число ЧР 4-го типа, увеличивало число ЧР 2-го типа. Из анализа ЧР, наблюдавшихся в ИЯДД можно сдеать вывод, что характерным признаком ЧР, возникающих как в случайгых воздушных полостях на границе электрод-стекло, так и специально созданных дефекта изоляции между стёеклами является возникновение ЧР в первой и третьей четвертях синусоиды с разницей фазовых углов 180°, тогда как ЧР, не имеющие пары, а также возникающие во 2-й и 4 четвертяхмогут быть отнесены к поверхностным частичным разрядам. Минимальный фазовый угол, выше которого могут возникать поверхностные ЧР, опреелённый по результатам расчётов напряжённости ЭП, представлен 10 колонке табл. 2.3 (ПР, fmin). В последних двух колонках табл. 2.3 приведены фазовые углы ЧР, которые могут быть отнесены к созданным дефектам изоляции.

Большинство ЧР, возникающих в ИЯДД с образцами с различными размерами дефектов вдоль поля и представленных в виде АФД на рис. 2.15, наблюдаются в первой и третьей четвертях синусоиды. Парные ЧР можно отнести к ЧР от различных по величине воздушных прослоек, включая и созданные дефекты. Поверхностные ЧР имеют являются нерегулярными и могут возникать в любой части синусоиды за исключением зон вблизи нулевых значений напряжения. Наблюдение некоторого числа ЧР вблизи нуля напряжения можно объяснить образованием на поверхности стекла проводящих дорожек и накоплением на этих образованиях зарядов, которые приводят к разряду при смене полярности, как это объясняется в гипотезе остающегося объёмного заряда.

2.4. Выводы к главе 2

Основными результатами главы 2 являются следующие:

1. Разработана конструкция и собрана экспериментальная установка с измерительной ячейкой типа плоского конденсатора с дисковыми электродами для измерения ЧР в изоляции с газовыми дефектами.

2. Выполнены расчёты электрического поля:

– в изоляции с дефектами шар и сфероид;

– в 6 образцах трёхслойной изоляции с воздушными дефектами;

– в тонких прослойках электрод–стекло;

– на границе электрод– стекло–воздух.

3. В результате расчётов ЭП получены:

– коэффициенты неоднородности поля;

– зоны и условия возникновения в установке ЧР различного типа;

– алгоритм отделения ЧР в воздушных полостях от поверхностных ЧР, который основан на том что ЧР в воздушных дефектах происходит по одному разу в первой и третьей четверти синусоиды с разнией фазовых углов возникновения ЧР в 180° и являются повторяющимися в каждом периоде синусоиды. Поверхностные ЧР не не имеют пары и могут происходить в любой четверти, если азовый угол возникновения больше некоторой величины, определяемой конструкцией электродной системы.

4. Проведены измерения ЧР в 6 типах образцов с газовыми дефектами разных размеров и выполнена статистическая обработка результатов измерений.

5. Установлено, что ЧР от воздушных дефектов без проводящих образований внутри полости происходят в первой и третьей четвертях периода синусоиды промышленной частоты. Многие ЧР являются парными со сдвигом по фазе на 180°.

ГЛАВА 3. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В УСТАНОВКЕ С ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКОЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

3.1. Конструкция ячейки и методика проведения измерений

Измерения, описанные в предыдущей главе, показали, что много ЧР возникает на границах электрод–диэлектрик–воздух и в тонких воздушных прослойках металл–диэлектрик. Эти дополнительные ЧР осложняют решение задач, поставленных в диссертации. Очевидным было решение создать новую измерительную ячейку, в которой эти две причины возникновения ЧР: границы и прослойки были бы устранены. Одним из таких возможных решений было поместить всю электродную систему в трансформаторное масло. В этом случае исчезали и границы раздела электрод–диэлектрик–воздух и тонкие воздушные прослойки. Можно было надеяться регистрировать только ЧР от образцов с созданными газовыми дефектами в изоляции [103, 104]. В высоковольтной лаборатории имелось несколько измерительных ячеек для контроля состояния трансформаторного масла и было принято решение попробовать провести измерения в такой ячейке. Пробная попытка оказалась удачной и в данном разделе диссертации описываются расчёты электрических полей в такой ячейке, методики приготовления образцов и проведения измерений ЧР и анализ полученных данных.

Измерительная ячейка для контроля состояния жидких диэлектриков (далее кювета) представлена на рис. 3.1, а, б [134].

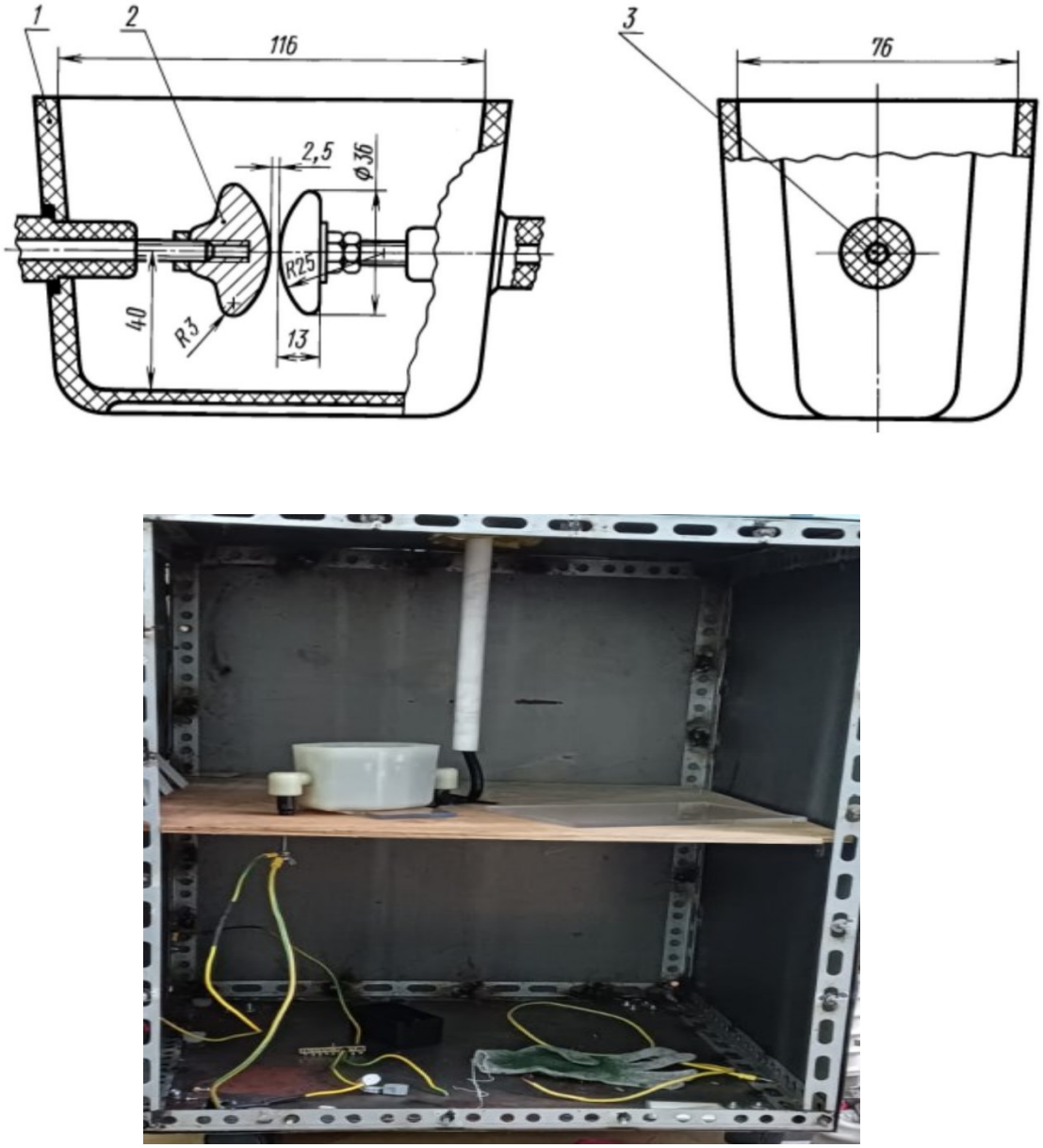


Рис. 3.1. Измерительная ячейка «кювета»: а – конструкция; б – внешний вид. 1 – сосуд для масла; 2 – электрод; 3 – вводы электродов

Электроды кюветы представляли собой сегмент шара с диаметром 5 см. Расстояние между электродами установлено равным 2,5 мм и проверялось специальным шаблоном. ЭП на оси симметрии электродов имеет наибольшую величину и близко к однородному. Коэффициенты неоднородности и их зависимость от расстояния между электродами приведены в следующем разделе. В схеме испытательной установки, в

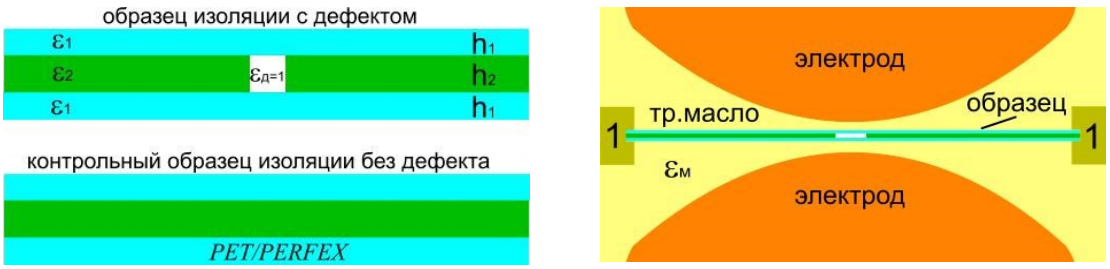
которой проводились измерения ЧР (рис. 2.1, а, б), кювета обозначена цифрой 1, а на рис. 2.2, б – символом $C_и$.

Объектами исследования являлись специально приготовленные образцы изоляции с цилиндрическими дефектами различного размера. Образец состоял из трёх слоёв: двух внешних защитных слоёв и внутреннего слоя изоляции с дефектом. Он имел квадратную форму со стороной 65 мм. Образцы внутреннего слоя изоляции с дефектом диаметром 2 мм имели различную толщину, т. е. разный размер дефекта вдоль поля: 0,15 мм; 0,2 мм; 0,25 мм; 0,3 мм; 0,35 мм; 0,4 мм; 0,45 мм и 0,5 мм. Сам дефект вырезался с помощью заострённой тонкостенной трубки из нержавеющей стали диаметром 2 мм точно по центру образца изоляции. Высверливание отверстий дрелью приводило к появлению на боковых поверхностях дефекта обугленных участков. Такие участки являются проводящими включениями в изоляции. Изучение ЧР в кавернах дефектов, имеющих проводящие включения, на данном этапе экспериментов не планировалось. Состояние поверхностей дефекта контролировалось по фотографиям под микроскопом с кратностью увеличения 1500. Для защиты изоляции и дефекта от проникновения масла, изоляция покрывалась защитными слоями – ламинировалась плёнкой из полиэстера (*PET/PERFEX*) толщиной 250 мкм с двух сторон. Для повышения достоверности отнесения ЧР к разрядам, происходящим в созданном дефекте, изготавливались контрольные образцы изоляции, которые отличающиеся от рабочих (с дефектами) только отсутствием в контрольных образцах самих дефектов. Сравнивая результаты измерений ЧР в рабочем и контрольном образце при одинаковых условиях наблюдения, можно отделить ЧР в дефектах от каких-либо других разрядов. С помощью специально сделанных направляющих (1, на рис. 3.2, б) образцы изоляции помещались между электродами ячейки так, чтобы дефект изоляции размещался на оси симметрии электродной системы кюветы, а образец был по центру между электродами. Особо контролировалось отсутствие соприкосновения какой–либо части образца и электрода. В таких

случаях в тонких зазорах возникали пробои масла, быстрое снижение общей электрической прочности масла и появление множества разрядов.

Перед каждым измерением ЧР проводились испытания пробивного напряжения трансформаторного масла и в ячейку заливалось масло с пробивным напряжением не менее 70 кВ. Температура и давление в лаборатории контролировалось в ходе экспериментов и определялась относительная плотность воздуха. До и после экспериментов выполнялось фотографирование каверны дефекта под микроскопом с кратностью увеличения 1500.

Образцы изоляции (рис.3.2.а) квадратной формы с шириной стороны 65 мм вставлялись между электродами ячейки (сегмент шара с диаметром 5 см) так, чтобы ось дефекта совпадала с осью электродной системы (рис.3.2.б). Это достигалось выбором размеров образца. При такой геометрии эксперимента дефект находился в области с наиболее сильным электрическом полем.



а) б)

Рис. 3.2. а – образцы изоляции; б – вид кюветы сверху: 1 – направляющие образца

3.1.1. Расчёт емкости измерительной ячейки

Для проведения различных расчётов, которые приводятся в данной главе, была создана программа для решения следующих задач:

– расчёт ёмкости объекта наблюдения с различными образцами изоляции;

– вычисление кажущегося заряда, длительности переднего фронта импульса и фазы возникновения ЧР ;

– моделирование переходного процесса при ЧР и вычисление его характеристик;

– представление измеренных ЧР в виде амплитудно-фазовых диаграмм.

Исходный модуль кода программы приведён в приложении.

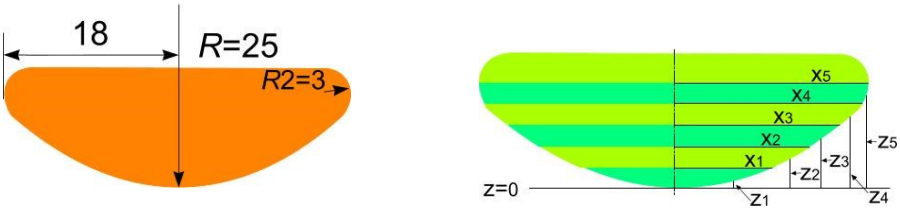
А) Ячейка без образца и без трансформаторного масла

Для сравнения экспериментальных и расчётных характеристик ЧР нужно знать ёмкости измерительной ячейки и ёмкости образцов до и после ЧР. Поскольку формулы для расчёта ёмкости с электродами ИЯ нет, то будем использовать формулу ёмкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon.\varepsilon_0.S}{d}, \qquad (3.1)$$

где $\varepsilon = 1$ – диэлектрическая постоянная воздуха; $\varepsilon_0 = 8{,}854.10^{-12}$ ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; S – площадь поверхности электродов, d = расстояние между электродами.

Электроды кюветы представляют собой секторы сферы радиуса *R*=25 мм с наибольшим радиусом x=18 мм в плоскости, перпендикулярной оси симметрии сектора (рис. 3.3).



а) б)

Рис. 3.3. Электрод кюветы: а – форма; б – разбиение на кольца при расчёте

Наибольший угол α между осью сектора и направляющей центрального конуса, опирающейся на этот сектор составляет 39,7°. Наибольший телесный угол Ω такого конуса в стерадианах равен двойному углу 2α в радианах Ω_{max}= 2arc Sin(x/R) = 1,6 ср. Наименьшее расстояние между электродами *d* =

2,5 мм. Расчёт ёмкости будем производить по формуле (3.4) плоского конденсатора. Поскольку расстояние между отдельными участками электродов изменяется, то для вычисления по (3.1) разделим поверхность электродов на кольцевые участки поверхности так, чтобы можно было считать кольцо плоским. Расстояние между соответствующими кольцами разных электродов можно принять равным расстоянию между средними точками поверхности этих колец. Число колец *N* определяется увеличением их числа до тех пор, пока различие ёмкости ячейки, вычисленное при различных *N*, не становится меньше заданной величины. По такой методике суммарная ёмкость ячейки ($C_и$) определится:

$$C_{из} = \varepsilon_0 \varepsilon \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i}{d_i}, \qquad (3.2)$$

где $S_i = \Omega_i \cdot R^2 - \sum_{i=1}^{i-1} S_i$ – площадь отдельного кольца; $\Omega_i = 2 * \mathrm{arcSin}\left(\frac{x_i}{R}\right)$, $x_i = 0 \div 18$ мм. – телесный угол участка сектора вместе с вычисляемым кольцом; $\sum_{i=1}^{i-1} S_i$ – сумма площадей предыдущих колец. Суммарная площадь поверхностных колец равна площади электрода ячейки S=$\Omega_{max} \cdot R^2 = 1004{,}8$ мм^2. Расстояние между кольцами d_i определяется как удвоенное расстояние z_i (рис. 3.3, б), которое равно расстоянию от средней точки кольца с радиусами x_{i-1} и x_i до плоскости, касательной к сектору в точке z=0 на рис. 3.3, б (плоскость *XY*) плюс кратчайшее расстояние между электродами ячейки, равное *d*:

$$d_i = 2z_i + d, \text{ где } z_i = R \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{R}\right)^2}\right) \qquad (3.3)$$

Результаты расчёта ёмкостей ячейки без образца при различном числе колец представлен в табл. 3.1. Очевидно, что деления поверхности электрода на 10 колец достаточно.

Таблица 3.1. Ёмкость кюветы без образца при различном числе замещающих колец

Число колец, N	3	5	10	100	1000
$C_{из}$ с маслом и без образца, пФ	4,236	4,222	4,215	4,213	4,213

Б) Ячейка с контрольным образцом (h = 0,35мм)

На рис. 3.1, а показаны образцы квадратной формы с цилиндрическим дефектом и контрольный образец изоляции без дефекта. При помещении образца с дефектом между электродами измерительной ячейки ёмкость ячейки изменяется. Её можно представить в виде двух параллельно соединённых ёмкостей: ёмкости столбика изоляции в котором имеется дефект ($C_{ст}$), как это показано на рис. 1.1 и ёмкости остальной части измерительной ячейки ($C_{из}$), которая с хорошей точностью равна ёмкости ячейки с контрольным образцом без дефекта. Образцы в измерительную ячейку помещались в середине между электродами (рис. 3.1, б). Неточность установки образца между электродами не приводит к изменению ёмкостей ячейки с образцом. Совпадение оси симметрии дефекта в образце с осью симметрии измерительной ячейки обеспечивалось размером образца, который был равен минимальной ширине кюветы с учётом направляющих [122].

Для расчёта ёмкости ячейки с образцом можно применить принцип единственности решения уравнения Лапласа, из которого следует возможность замены эквипотенциальных поверхностей тонкими проводящими листами [120, 132]. Тогда ячейку с образцом можно представить в виде пяти последовательно соединённых ёмкостей: 1-ёмкость системы электрод ВН-верхняя поверхность защитной плёнки образца; 2-ёмкость защитной плёнки; 3-ёмкость слоя изоляции, в которой для испытательных бразцов создаётся дефект; 4-ёмкость защитной плёнки; 5-ёмкость системы заземлённый электрод – поверхность защитной плёнки.

Тогда, ёмкость ячейки с контрольным образцом равна сумме 5 последовательно соединённых ёмкостей:

$$\frac{1}{C_{из}} = \frac{2}{C_1} + \frac{2}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \quad (3.4)$$

C_1 вычисляется по (3.2) при

$$d_i = z_i + \frac{d}{2} - h_1 - h_2/2 \quad (3.5)$$

при ε = 2,3 масла

C_2 вычисляется по (3.1), где S – площадь образца (S_{ob}) с размерами 65х65 мм, т.е. $S = 4225$ мм^2, $\varepsilon_1 = 2{,}35$ – полиэстера; $d = h_1$.

C_3 вычисляется также как и C_2 но с $\varepsilon = \varepsilon_2 = 6{,}1$ и $d = h_2$.

При расчёте общей емкости ячейки с испытательным образцом ёмкости 1 и 5, а также 2 и 4 попарно равны: $C_1 = C_5$, $C_2 = C_4$.

При наличии дефекта в изоляции считают отдельно ёмкость столбика изоляции с дефектом и ёмкость остальной части изоляции по (1.2). Ёмкость такого столбика также состоит из 5 последовательно соединённых емкостей как в (3.4), но площади S в формулах следует заменить на площадь каверны дефекта. Ёмкость самого дефекта можно рассчитать по формуле (3.1):

$$C_3 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 . S_{cav}}{h_2} \quad (3.6)$$

где S_{cav} – площадь дефекта с диаметром d_{cav} = 2 мм; $h_2 =$ 0,35 мм – толщина изоляции (размер дефекта вдоль поля); ε =1 - диэлектрическая проницаемость воздуха.

$$S_{cav} = \frac{\pi d_{cav}^2}{4} = 3{,}142.10^{-6}\text{м}^2 \quad (3.7)$$

Пусть $h_1 =$ 0,25 мм ; $h_2 =$ 0,35 мм ; d_{cav}=2 мм; $\varepsilon_1 =$ 2,35 , $\varepsilon_2 = 6{,}1$, $\varepsilon_3 = \varepsilon = 1$, тогда, емкость дефекта C_3 равна $C_3 = \frac{\varepsilon . \varepsilon_0 . S_{cav}}{h_2} = 79{,}473$ фФ.

Емкость C_1 по – $C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_м \cdot S_{cav}}{d_1} = 77{,}547$ фФ.

Емкость C_2 – емкость после ЧР получается по формуле:

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 . \varepsilon_1 . S_{cav}}{h_1} = 261{,}467 \text{ фФ}.$$

Результаты расчёта ёмкостей ячеек различных образцов представлены в табл. 3.2. Реактивное сопротивление ячейки при f=50 Гц, $X_{из}$ рассчитывается по формуле: $X_{из} = \frac{1}{2\pi f \cdot C_{из}}$.

Таблица 3.2. Расчётные характеристики ИЯ–кювета

Размер h_2, мм	0,15	0,2	0,25	0,3	0.35	0,4	0,45	0,5
$C_{из}$, пФ	4,552	4,623	4,697	4,777	4,854	4,938	5,025	5,117
$q_{ЧР}$, пКл	25,5	36,5	47,5	59	73	87	104	122
$dC_{ст}$, фФ	-3,52	-4,68	-5,84	-7,0	-8,16	-9,36	-10,56	-11,78
dU, В	-5,6	-7,9	-10,1	-12,4	-15	-17,6	-20,6	-23,8
Реактивное сопротивление на 50 Гц, Мом	699	688,2	677,4	666,5	655,5	644,4	633,1	621,8
C_1 , фФ	69,16	71,08	73,12	75,27	77,55	79,97	82,55	85,3
C_2, фФ	261,47							
C_3, фФ	185,44	139,08	111,26	92,72	79,47	69,54	61,81	55,63
$C_{до}^{ст}$, фФ	23,83	23,27	22,73	22,22	21,73	21,26	20,81	20,38
$C_{после}^{ст}$, фФ	27,35	27,95	28,57	29,22	29,9	30,62	31,37	32,16

При повышении напряжения между электродами ячейки возрастает напряжённость электрического поля внутри дефекта. При достижении некоторого критического значения в воздушной полости дефекта возникают условия самостоятельного газового разряда [96-102]. Разряд имеет лавинных характер и состоит из двух ступеней. Первая ступень – лавинный разряд между гранями каверны с различным потенциалом вдоль силовых линий электрического поля и накопление электронов около поверхности границы воздух-диэлектрик. По мере роста числа электронов увеличивается напряжённость электрического поля, создаваемая этими электронами как вдоль, так и перпендикулярно приложенному внешнему полю от электродов ячейки. При превышении перпендикулярной составляющей поля электронных лавин критической величины начинается разряд вдоль поверхности раздела воздух – диэлектрик. Процесс продолжается до тех пор, пока суммарное поле электронов, распределённых в воздухе у границ

дефекта, не становится равным и противоположным по знаку внешнему полю. Это эквивалентно исчезновению ёмкости дефекта [128]. Для расчёта ёмкости столбика изоляции, содержащего воздушный дефект до и после ЧР, можно применить формулы (3.2)–(3.6) с площадью обкладок S_i=3,14 мм^2 - равной площади основания цилиндрического дефекта.

Ёмкость столбика изоляции с дефектом вычисляется также, как и ёмкость ячейки с контрольным образцом по (3.4) с учётом того, что площади обкладок всех конденсаторов одинаковы и равны

Ёмкость столбика с дефектом $C_0^{ст}$ (до ЧР в каверне дефекта).

$$\frac{1}{C_{до}^{ст}} = \frac{2}{C_1} + \frac{2}{C_2} + \frac{1}{C_3} = 4{,}6 \cdot 10^{13}\ Ф^{-1}.$$

Ёмкость столбика с дефектом $C_{после}^{ст}$ (после ЧР в каверне дефекта)

$$\frac{1}{C_{после}^{ст}} = \frac{2}{C_1} + \frac{2}{C_2} = 3{,}34 \cdot 10^{13}\ Ф^{-1}.$$

Если ввести обозначения емкости столбика с дефектом до ЧР, после ЧР и их разности - $C_{до}^{ст}$, $C_{после}^{ст}$, соответственно, то для дефекта с $h2$ = 0,35 мм, $h1$= 0,25 мм и так - $C_{до}^{ст} = 21{,}7$ фФ, $C_{после}^{ст} = 29{,}9$ фФ.

После частичного разряда ёмкость столбика с дефектом увеличилась. Пусть ЧР произошёл при напряжении $U_{ЧР}$ между электродами. За время ЧР плотность зарядов на поверхности электродов σ измениться не успевает. Если источник питания не успевает изменить заряд на ячейке за время ЧР, то можно считать, что заряд на обкладках конденсатора до и после ЧР одинаков. Тогда, для столбика с дефектом из равенства зарядов до и после ЧР:

$$U_{ЧР} \cdot C_{до}^{ст} = (U_{ЧР} + dU^{ст}) \cdot C_{после}^{ст} \qquad (3.8)$$

получаем бросок напряжения на столбике после ЧР:

$$dU^{ст} = -U_{ЧР} \cdot \frac{dC^{ст}}{C_{после}^{ст}} = 2{,}43\ кВ \qquad (3.9)$$

Бросок напряжения на столбике с дефектом получается отрицательным и очень большим. Возникающий на столбике отрицательный импульс напряжения распространяется от места возникновения в центре электродов на всю их поверхность электрода со скоростью света – v~300 мм/нс. Через

время $t = l_э$ /v=20 мм/300 мм/нс=0,067 нс импульс добежит до края электрода, т. е. охватит весь электрод. Ответ на вопрос справедливо ли утверждение (3.8) при таком малом времени или нужно использовать уравнения сохранения заряда при ЧР для всего электрода, а не только столбика с дефектом, можно получить из сравнения полученного времени с длительностью переднего фронта импульса ЧР.

Длительность переднего фронта ЧР можно определить суммой времени прохождения лавины электронов вдоль силовой линии между гранями дефекта и времени движения вторичных лавин вдоль «анодной» грани дефекта в перпендикулярной к вектору напряжённости электрического поля плоскости. При подвижности электронов μ = 0,045 м^2/(В·с) и напряжённости поля в момент ЧР $E_{ЧР}$ = 6,15 кВ/мм дрейфовая скорость лавины будет равна $V_{др} = \mu \cdot E_{ЧР} = 0{,}045 \cdot 6{,}15 \cdot 10^6 = 276750$ м/с = 0,28 мм/нс. Тогда длительность переднего фронта можно оценить, как время, равное ~2÷5 нс. Это время существенно больше времени пробега импульса, т. е. уменьшение напряжения при ЧР будет захватывать не только столбик с дефектом, но и весь электрод в процессе развития ЧР. Тогда вместо (3.8) следует записать закон сохранения заряда для всего электрода:

$$q = U_{ЧР} \cdot \left(C_{из} + C_{до}^{ст}\right) = (U_{ЧР} + dU) \cdot \left(C_{из} + C_{после}^{ст}\right). \qquad (3.10)$$

Из уравнения (3.10), можно получить связь между измерением ёмкости при ЧР ($dC_{ст}$), которую можно рассчитать, зная размеры дефекта, изменением напряжения на всей ёмкости кюветы (dU) – измеряется в эксперименте) с их ёмкостями и понятием кажущегося заряда при ЧР ($q_{чр}$):

$$U_{чр} \cdot \left(C_{из} + C_{до}^{ст}\right) = \left(U_{чр} + dU\right) \cdot \left(C_{из} + C_{после}^{ст}\right)$$

$$U_{чр} \cdot C_{из} + U_{чр} \cdot C_{до}^{ст} = U_{чр} \cdot C_{из} + U_{чр} \cdot C_{после}^{ст} + dU \cdot C_{из} + dU \cdot C_{после}^{ст} \cdot$$

$$U_{чр} \cdot C_{до}^{ст} = U_{чр} \cdot C_{после}^{ст} + dU \cdot C_{cell} + dU \cdot C_{после}^{ст}$$

$$U_{чр} \cdot C_{до}^{ст} - U_{чр} \cdot C_{после}^{ст} = dU \cdot C_{из} + dU \cdot C_{после}^{ст}$$

$$U_{чр} \cdot \left(C_{до}^{ст} - C_{после}^{ст}\right) = dU \cdot \left(C_{из} + C_{после}^{ст}\right)$$

Поскольку $C_{после}^{ст} \ll C_{из}$, получаем

$$U_{\text{чр}} \cdot dC_{\text{ст}} = dU \cdot \text{C}_{\text{из}} = q_{\text{чр}} \quad (3.11)$$

$$dU = -U_{\text{ЧР}} \frac{|dC_{\text{ст}}|}{C_{\text{из}}}. \quad (3.12)$$

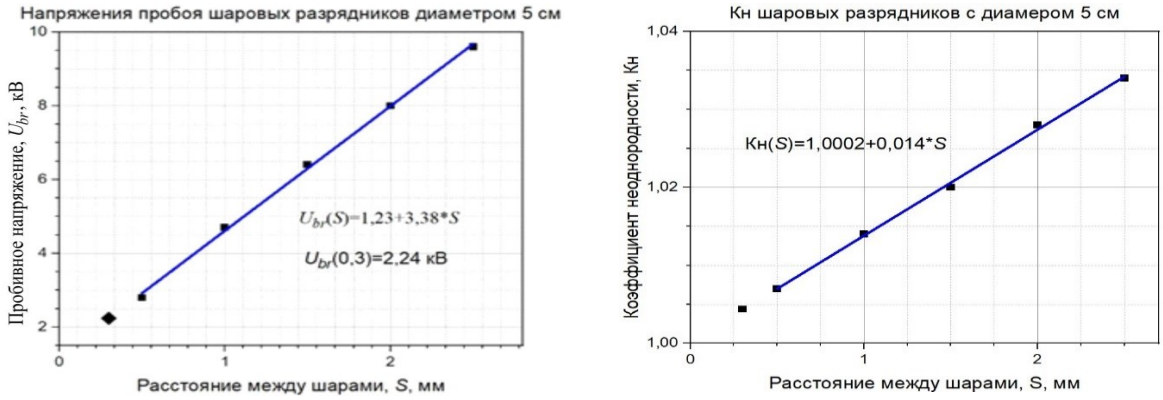
Произведение $dU \cdot \text{C}_{\text{из}} = q_{\text{ЧР}}$ называется кажущимся зарядом

Амплитуда броска напряжения на изоляции при ЧР пропорциональна напряжению, при котором ЧР происходит и отношению изменения ёмкости столбика с дефектом к величине ёмкости ячейки, т.е. зависит от ёмкости дефекта. При известных размерах дефекта и измеренном напряжении возникновения ЧР можно оценить величину броска напряжения при ЧР по (3.12). Расчётные значения приведены в табл. 3.2.

3.2. Расчёты ЭП электродной системы кюветы

3.2.1. Электрическое поле кюветы без масла и образца

ЭП в области пространства между электродами кюветы является, по сути, ЭП шарового разрядника с диаметром шаров 5 см и расстояние между электродами 2,5 мм. Это было проверено прямым расчётом ЭП от электродной системы кюветы на рис. 3.1 и сравнения с полем шарового разрядника. Используя пробивные напряжения, приведённые в ГОСТ [6], были рассчитаны напряжённости ЭП, при которых происходит пробой, и коэффициенты неоднородности поля по (2.1) в зависимости от расстояний между электродами. Зависимости пробивного напряжения и рассчитанные коэффициенты неоднородности представлены на рис. 3.4. Пробивное напряжение при расстоянии 0,3 мм высчитано по линейной экстраполяции и изображено символом «♦» на рис. 3.4, а.



а) б)

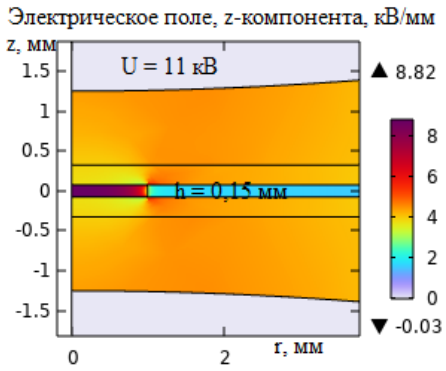
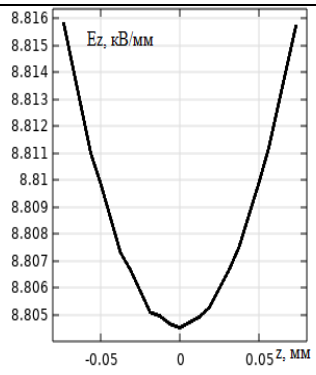
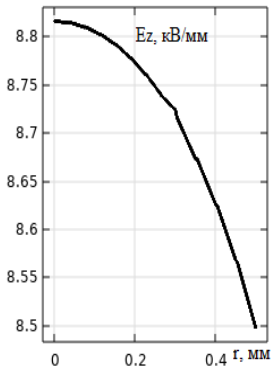
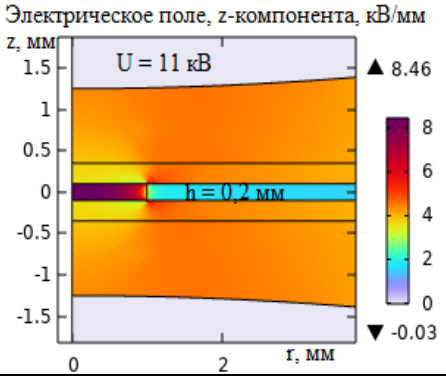
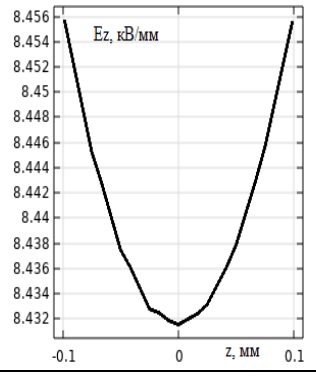
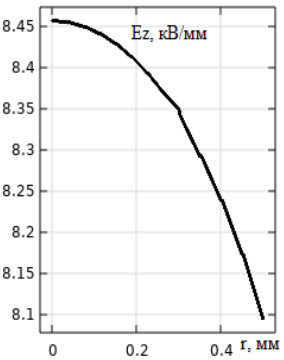
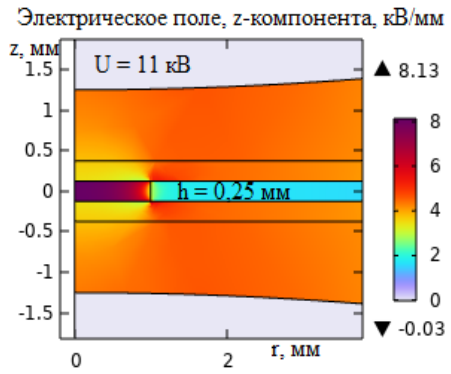
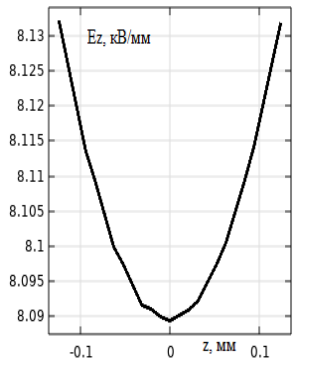
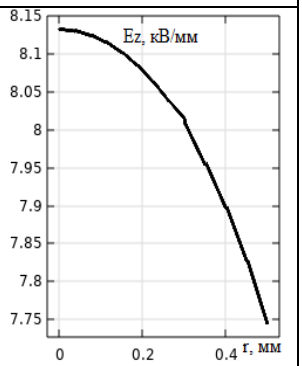
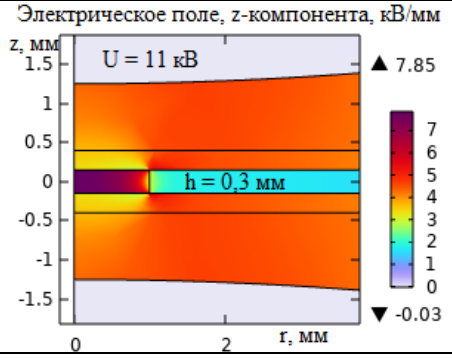
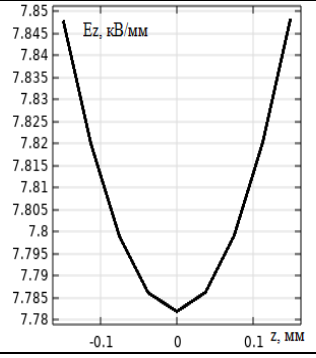
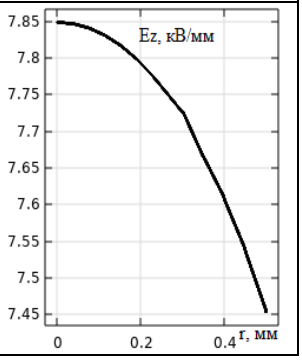
Рис. 3.4. Зависимость от расстояния между шарами диаметром 5 см: а – пробивного напряжения (U_{br}); б – коэффициента напряжённости ($К_н$)

3.2.2. Электрическое поле кюветы с маслом и образцом

В ходе моделирования электроды располагались на расстоянии 2,5 мм друг от друга, а образец твердого диэлектрика с газовым дефектом был погружен в трансформаторное масло (рис. 3.2, б). При моделировании, толщина изоляции с дефектом изменялась в диапазоне от 0,15 мм до 0,5 мм. Расчёты производились при отрицательном напряжении на верхнем электроде 11 кВ. Результаты расчётов ЭП в кювете с маслом и образцами изоляции с газовыми дефектами представлены в табл. 3.3. $К_н$ рассчитывались по (2.1) [46].

Максимальная напряженность поля (E_{max}) находится в точках на оси симметрии на границе воздушный дефект - защитный слой изоляции. Если образец расположен по центру между электродами, то напряжённости на границах дефекта равны. Средняя напряжённость по (2.1) для всех образцов одинакова и равна $\mathrm{E_{ср}} = \frac{11\text{кВ}}{2{,}5\text{мм}} = 4{,}4\ \text{кВ/мм}$. Результат расчётов сведены в табл. 3.4.

Таблица 3.3. Результаты расчётов ЭП методом конечных элементов в кювете с образцами изоляции различной толщины с дефектом

Размер дефекта h2, мм	Распределение напряжённости в изоляции с дефектом, кВ/мм	Распределение E_z(z) внутри дефекта вдоль оси симметрии, кВ/мм	Распределение $E_z(r)$ вдоль радиуса на высоте края дефекта, кВ/мм
0,15			
0,2			
0,25			
0,3			

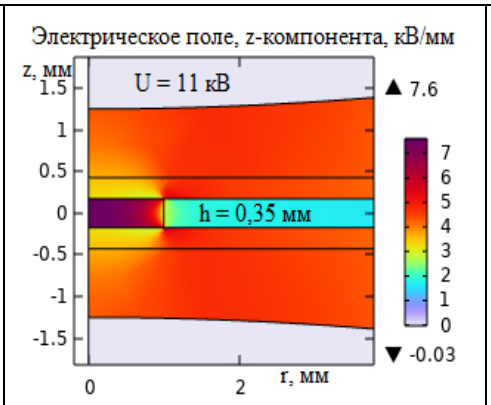
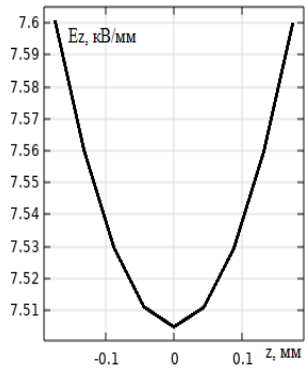
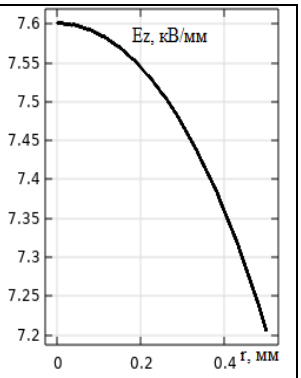
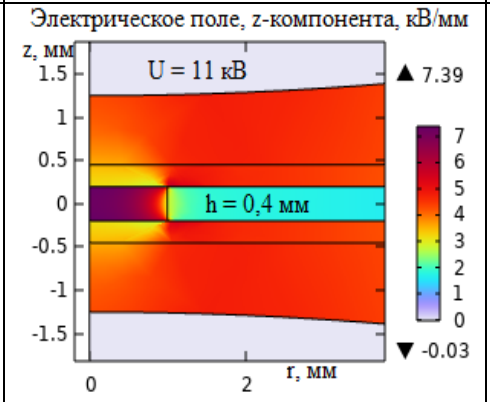
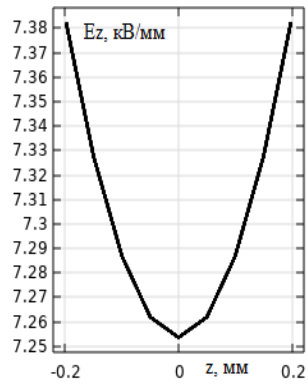
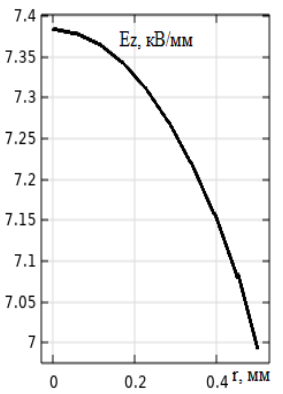
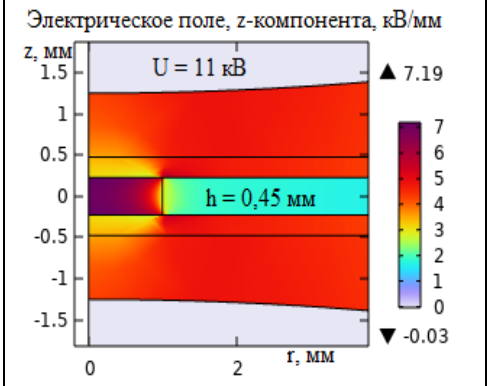
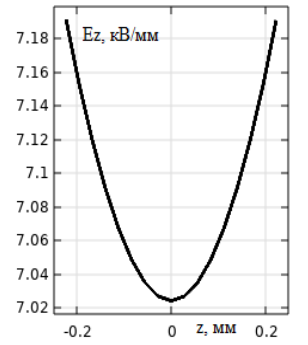
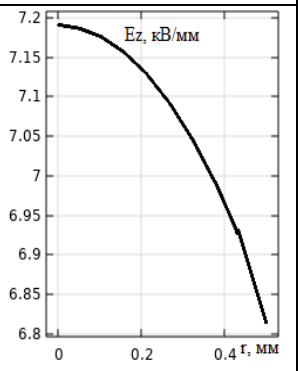
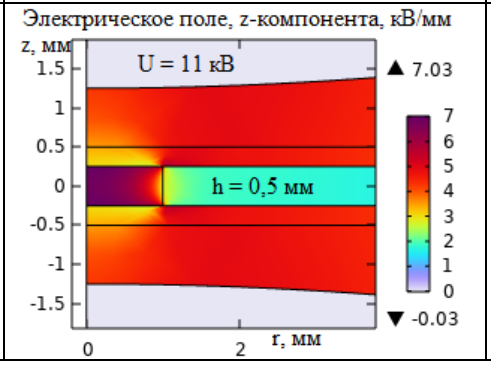
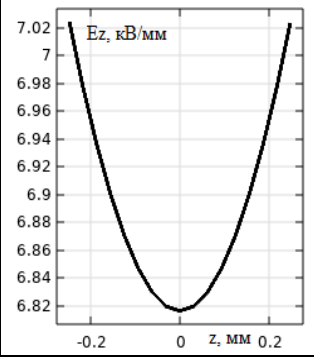
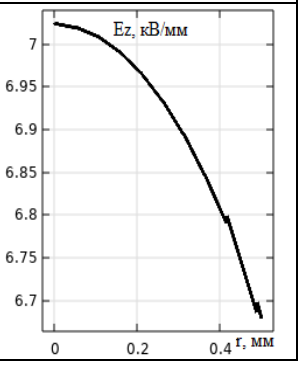
0,35	Электрическое поле, z-компонента, кВ/мм U = 11 кВ h = 0,35 мм ▲ 7.6 ▼ -0.03 z, мм r, мм	Ez, кВ/мм z, мм	Ez, кВ/мм r, мм
0,4	Электрическое поле, z-компонента, кВ/мм U = 11 кВ h = 0,4 мм ▲ 7.39 ▼ -0.03 z, мм r, мм	Ez, кВ/мм z, мм	Ez, кВ/мм r, мм
0,45	Электрическое поле, z-компонента, кВ/мм U = 11 кВ h = 0,45 мм ▲ 7.19 ▼ -0.03 z, мм r, мм	Ez, кВ/мм z, мм	Ez, кВ/мм r, мм
0,5	Электрическое поле, z-компонента, кВ/мм U = 11 кВ h = 0,5 мм ▲ 7.03 ▼ -0.03 z, мм r, мм	Ez, кВ/мм z, мм	Ez, кВ/мм r, мм

Таблица 3.4. Основные результаты расчётов ЭП кюветы с образцами

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8
Общая толщина изоляции, мм	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
Размер дефекта вдоль поля $h2$, мм	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
E_{max}, кВ/мм	8,82	8,46	8,13	7,85	7,6	7,39	7,19	7,03
Коэффициент неоднородности поля $K_н$	2	1,92	1,84	1,78	1,72	1,68	1,63	1,6

После обработки результатов моделирования методом наименьших квадратов была получена формула зависимости коэффициента неоднородности электрического поля внутри дефекта от его размера по оси z:

$$K_H = 2{,}28 - 2{,}1 \cdot h_2 + 1{,}5 \cdot h_2^2 \qquad (3.13)$$

где h_2- размер дефекта вдоль поля в мм (рис. 3.2, а).

Эта зависимость представлена на рис. 3.5.

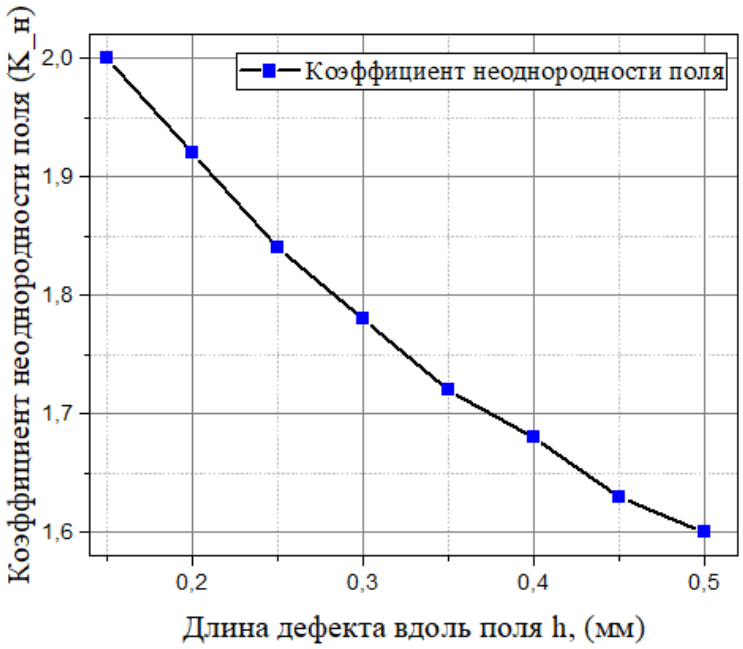


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента неоднородности от размера дефекта

Для ячейки без масла и без образца K_H имеет вид (рис. 3.4, б):

$$K_H = 1{,}0002 + 0{,}014 \cdot S. \qquad (3.14)$$

Коэффициент неоднородности поля не зависит от величины приложенного напряжения, а только от конфигурации электродной системы и образца. Проведенные расчёты напряжённости поля при нескольких различных значениях напряжениях на высоковольтном электроде показали, что с ростом напряжения максимальная напряжённость увеличивается, но коэффициент неоднородности поля остаётся постоянным и не зависит от величины приложенного напряжения. Знание коэффициента неоднородности поля позволяет, зная расстояние между электродами, определить по (2.1) напряженность поля внутри воздушного дефекта по измеренному напряжению на электродах.

В отличие от сферического дефекта, в котором напряжённость поля во всех точках одинакова, в цилиндрическом дефекте напряженность в различных областях дефекта различается. Вдоль оси симметрии от краёв к центру дефекта напряжённость убывает (табл. 3.3, $E_z(z)$) и минимальна в центре дефекта. Различие между наибольшей и наименьшей напряжённостью равно 0,11 кВ/мм. В процентах это изменение составляет 1,4%. При отходе от центра вдоль оси r, напряжённость убывает (табл. 3.3, $E_z(r)$). Такое распределение напряжённости поля по объёму воздушного дефекта позволяет говорить о месте зарождения лавин ЧР. При размере дефекта вдоль поля h = 0,35 мм произведение давления воздуха внутри дефекта на его размер вдоль поля равно ~ 30 торр·см, что соответствует лавинному характеру ЧР. Лавины ЧР возникают в месте наибольшей напряжённости на границе дефекта воздух–полиэстер при достижении условий возникновения самостоятельного разряда. Из двух границ дефекта одну, расположенную ближе к электроду с меньшим потенциалом, можно условно назвать «катодной» границей. Именно на этой границе наибольшая напряженность поля в дефекте и наибольшее расстояние вдоль поля до противоположной границы. Больше расстояние пройдёт лавина электронов в поле, Зарождение первичных лавин происходит на этой границе.

Противоположную границу дефекта условно можно назвать «анодной» границей. Лавины электронов дойдя до этой границы затормаживаются, накапливаются и разлетаются вдоль её поверхности. Через половину периода, когда полярность электродов меняется, «катодная» граница превращается в «анодную» и наоборот. Поскольку «катодная» граница дефекта меняется с «анодной» при смене полярности внешнего напряжения, то при различии напряженностей на границах дефекта ЧР могут иметь различающиеся напряжения возникновения ЧР на положительном и отрицательном полупериодах синусоиды промышленной частоты.

При проведении экспериментов без применения направляющих, что было в ранних опытах, образцы могли отклоняться вдоль оси Z от расположения точно по центру между электродами ячейки. Поскольку поле имеет слабую неоднородность вдоль оси симметрии Z (Табл. 3.3, $E_z(z)$), то такое возможное смещение образца приводит к тому, что максимальная напряжённость на нижней и верхней границах дефекта начинает различаться.

На рис. 3.6 показано такое расхождение $К_н$ для точек, лежащих на верхней границе дефекта на оси симметрии (top) и на нижней границе (bottom).

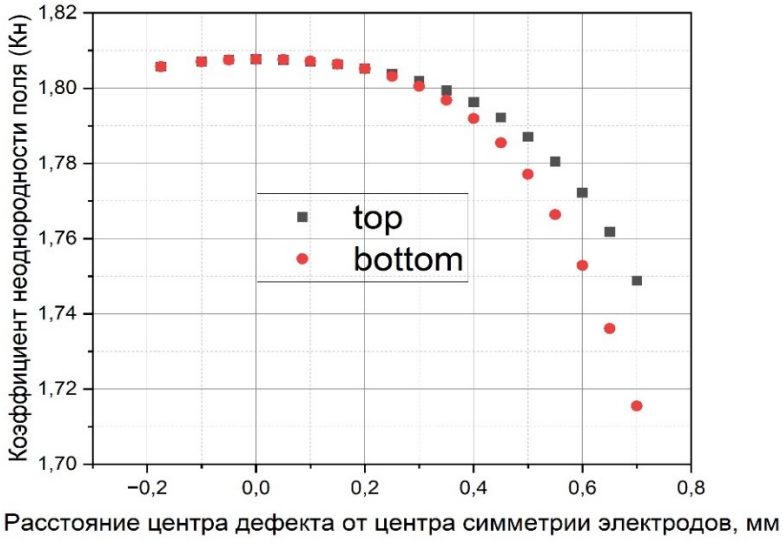


Рис. 3.6. Изменение Кн при нецентральном положении образца

По расчётам максимальное различие Кн составило 6%, что эквивалентно различию фазы возникновения ЧР в положительном и отрицательном полупериодах до угла в 12°. Для предотвращения неопределённости измерения фазы ЧР, вызванного неконтролируемым сдвигом дефекта из центрального положения между электродами, в измерительную ячейку помещалось направляющие (1 на рис. 3.2, б), центрирующее образцы.

Аналогичная ситуации возникает в изоляции с неоднородным электрическим полем. Напряжённость поля на границах дефекта, возникшего в такой изоляции, различается, что при отсутствии остающегося объёмного заряда должно привести к различию фаз возникновения ЧР на положительном и отрицательном напряжении.

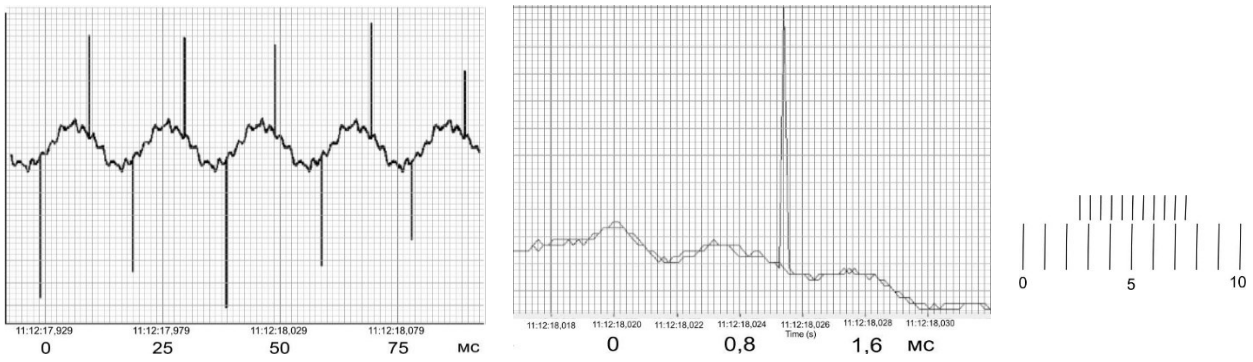
3.3. Измерение ЧР в образцах изоляции в кювете

Измерения ЧР в образцах выполнялись по методике, описанной в главе 2. Амплитудное значение прикладываемого наприяжения изменялось от 0 до 15 кВ, что соотвествует наибольшее среднней напряженности ЭП в изоляции 6 кВ/мм. В высоковольтной изоляции электротехнических устроиств такая наприяженность обычно достигается при номинальных напряженниях.

Сдвиг фазы напряжения на электродах кюветы и током в измерительном сопротивлении был также, как и ИЯДД, равен 90°.

Напряжение с измерительного сопротивления подавалось на осциллограф *TDS*-2004, а с цифрового выхода осциллографа – на компьютер. Особенностью записи оцифрованного сигнала под управлением *LabView* являлось фрагментирование записи, т. е. в памяти компьютера сохранялись отдельные фрагменты из 5000 выборок (один экран осциллографа) с заданным шагом между выборками. Число фрагментов изменялось от 20 до 2000. Время отдельного фрагмента изменялось от 20 до

100 мс, что соответствовало времени между отдельными выборками от 4 до 20 мкс. Вид отдельного фрагмента записи с представлен на рис. 3.7.



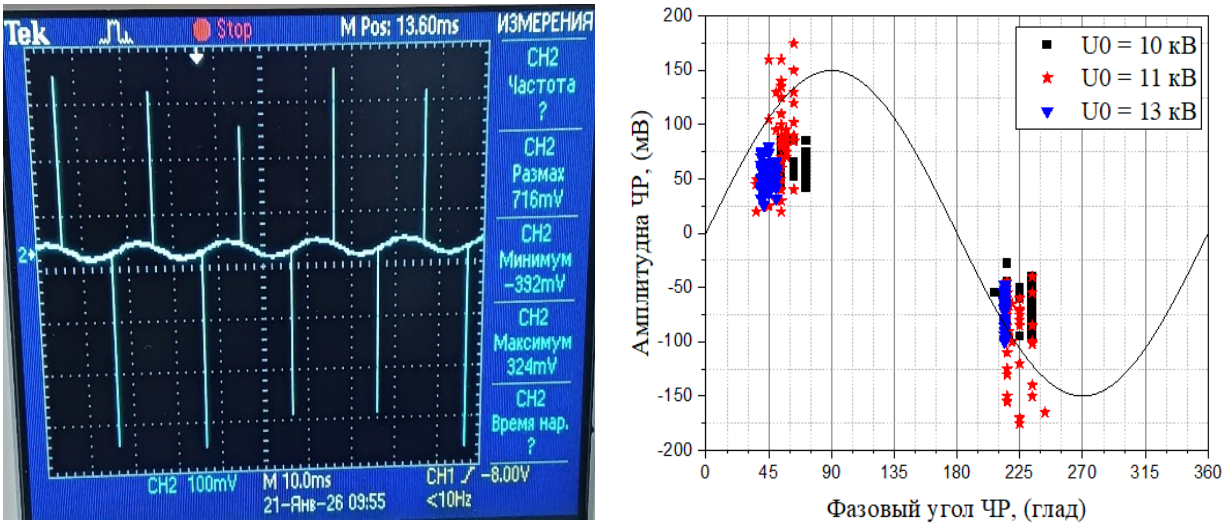
а) б) в)

Рис. 3.7. Фрагмент записи сигнала с ЧР: а – время записи 100 мс; б – участок с одним ЧР; в – вспомогательные линейки

На рис. 3.7, а минимальная цена деления составляет 1,25 мс.

Если измерение времени появления ЧР производить по этому фрагменту, то ошибка измерения $t_{чр}$ составит ±0,625 мс, что соответствует погрешности в измерении фазового угла возникновения ЧР ±11,25°. Для некоторых качественных измерений этой точности достаточно. При использовании вспомогательной, подстраиваемой под размер ближайшего расстояния между линиями сетки, шкалы (рис. 3.7, в) точность определения $t_{чр}$ можно повысить на порядок. Поскольку оцифровка спектра производится на этом фрагменте через 0,02 мс, можно изменить масштаб времени так, как это показано на рис. 3.6, б. Минимальная шкала деления по времени в этом случае равна 0, 04 мс. Погрешность при измерении $t_{чр}$ составит ±0,02 мс или ±0,36°. Присутствие в спектре сигнала примеси 9й гармоники позволяет более точно определить максимум на синусоиде напряжения на измерительном сопротивлении, который соответствует нулевому значению напряжения на электродах кюветы. Измерения $t_{чр}$ проводились вручную для каждого ЧР при масштабах по оси времени 1,25 мс или 0,625 мс. В некоторых случаях при масштабе 0,04 мс. Снимок экрана осциллографа с

ЧР для образца с величиной дефекта вдоль поля h = 0,35 мм и его АФД показана на рис. 3.8. В отличие от разнообразных ЧР предыдущего раздела, в этих измерениях все разряды парные со сдвигом близким к 180°. Повышение приложенного к электродам кюветы напряжения приводит к уменьшению фазового угла в соответствие с (1.1). На рис. 3.8, б представлены ЧР, возникающие при различных приложенных напряжениях в образцах с одинаковымис одинаковыми дефектами, которые выполнялись в разное время. Некоторый разброс в значениях фазового угла можно объяснить неконтролируемым сдвигом образца по оси Z, который присутствовал в экспериментах до осознания необходимости установки направляющих. Все ЧР наблюдаются в 1–ой и 3–ей четвертях синусоиды. При установке в кювету контрольного образца, а эта проверка делалась перед каждым новым измерением, ЧР не наблюдалось [112-118].



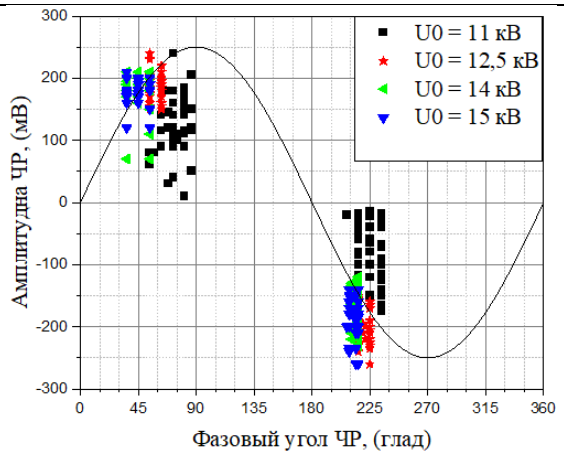
а) б)

Рис. 3.8. ЧР в дефекте с h = 0,35 мм: а – снимок экрана осциллографа с маркировкой *TDS*-1004; б – АФД

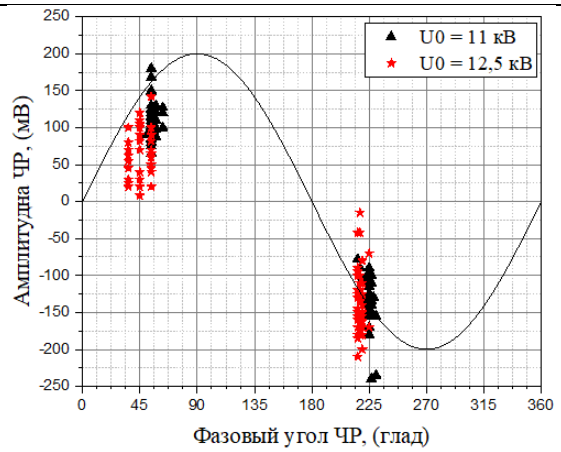
Частичные разряды имели апериодическую форму и наблюдались дважды за период, т. е. имели частоту повторения ЧР 100 Гц. Одни и те же образцы измерялись через различные промежутки времени, в течение

которых они находились под напряжением. За суммарное время 400 часов под напряжением 10 ÷ 15 кВ заметных изменений фазы и амплитуды ЧР не наблюдалось. Регулярное фотографирование дефекта под микроскопом заметных изменений в материале не выявили. Различие амплитуд отдельных ЧР не превышало 20% от максимального уровня при времени интегрирования 20 мкс.В таблице 3.5 представлены АФД ЧР в образцах с различными размерами [137, 139].

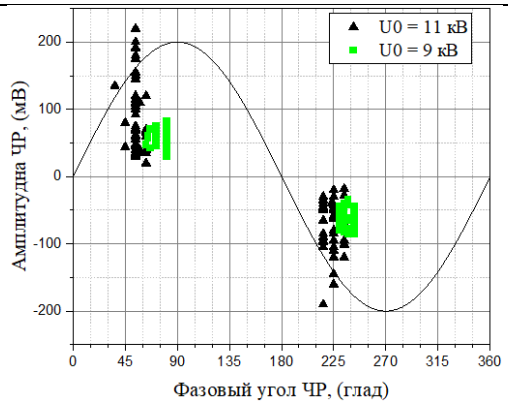
Таблица 3.5. АФД ЧР в образцах с различными размерами



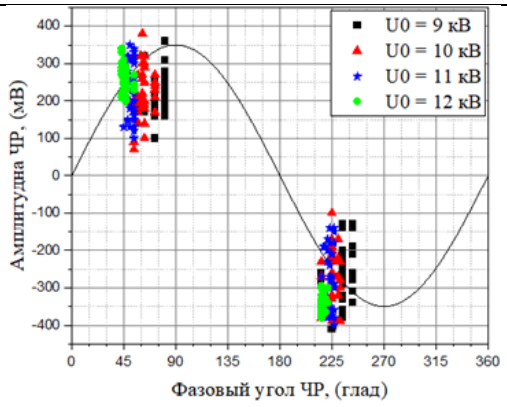
а – h=0,15 мм



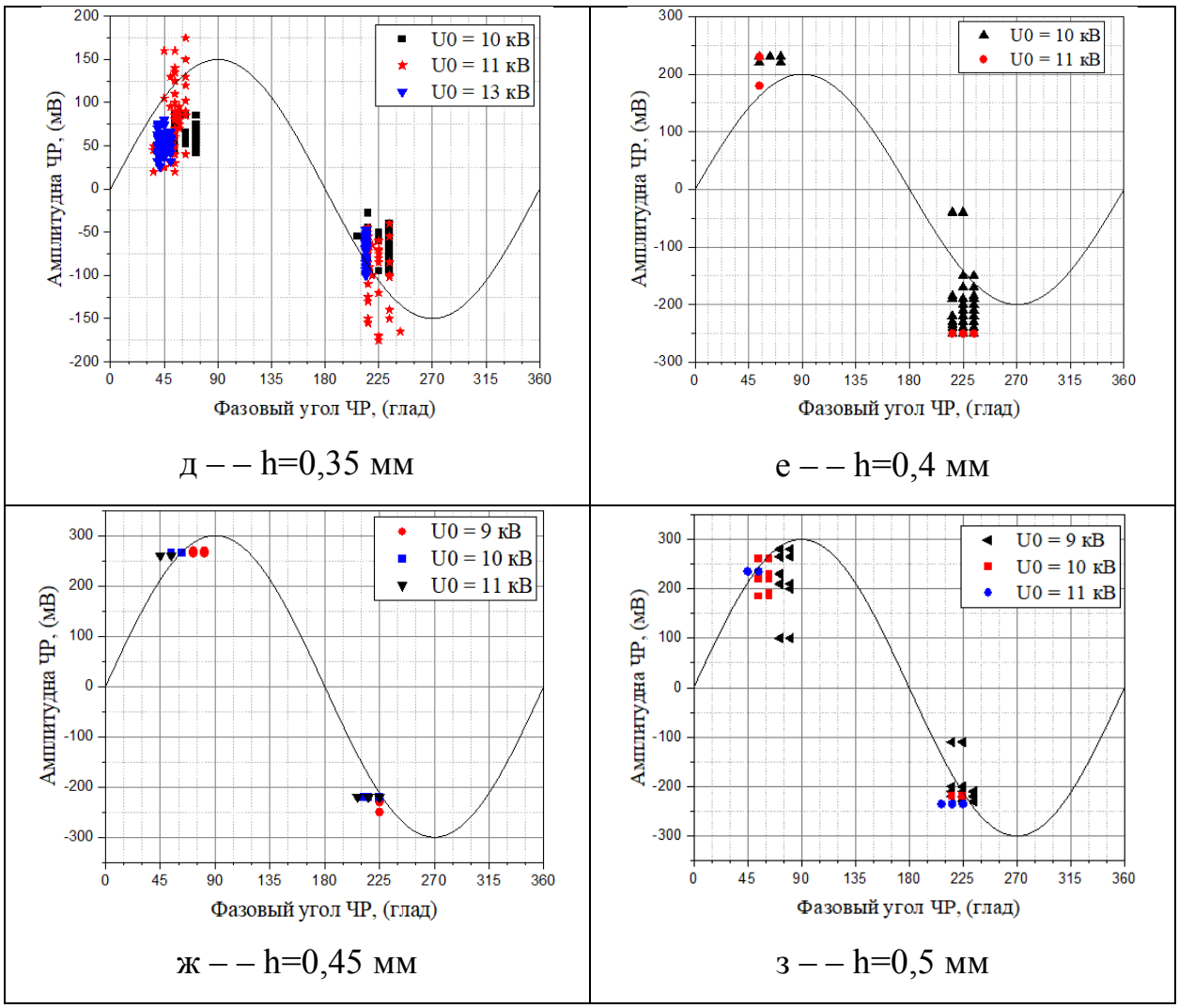
б – – h=0,2 мм



в – – h=0,25 мм



г – – h=0,3 мм



По результатам измерений ЧР в образцах с различными размерами дефектов (Приложение 3) была составлена сводная табл. 3.6. Величины напряжений возникновения ЧР в положительном (Uчр+) и отрицательном (Uчр-) полупериодах получены по (1.1) по устеднённым значениям tчр+ и tчр- из приложения 3, соответственно. Усреднение и определение доверительного интервала при доверительной вероятности 0,95 проводилось для каждого размера образца для каждого амплитудного значения при последующем усреднении для всех напряжений. В пределах ошибки измерения напряжения возникновения ЧР не завист от величины амплитудного значения приложенного напряжения. От этой величины зависят только времена возникновения ЧР tчр+ и tчр-. Обнаруженное различие напряжений *U*чр+ и *U*чр- выходит за границы погрешности измерений, а также превышает величина, которая могла бы возникнуть при

несимметричном расположении образцов из-за различий напряжённостей на разных гранях образца в соответствии с рис. 3.6. Напряжённость поля, при которой возникает ЧР в положительном (*E*чр+) и отрицательном (*E*чр-) полупериодах, определялась как произведение средней напряженности $E_{ср.ЧР}$ по (2.1) в момент ЧР на коэффмциент неоднородности (Кн) по (3.13). Символами Δ*U*чр+ и Δ*U*чр– в табл. 3.6 обозначены величины полуширины доверительного интервала при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 3.6. Результаты измерения ЧР в образцах с различными размерами дефектами

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8
Общая толщина изоляции, мм	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
Размер дефекта вдоль поля *h*, мм	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$U_{ЧР}+$, кВ	10,57	8,94	8,90	8,74	8,97	8,91	8,67	8,72
$\Delta U_{ЧР}+$, кВ	0,24	0,18	0,10	0,10	0,17	0,05	0,09	0,08
$E_{ср.ЧР}+$, кВ/мм	4,23	3,57	3,56	3,50	3,58	3,56	3,47	3,49
$E_{ЧР}+$, кВ/мм	8,46	6,86	6,55	6,22	6,17	5,99	5,66	5,58
Кн	2	1,92	1,84	1,78	1,72	1,68	1,63	1,6
$U_{ЧР}–$, кВ	7,96	7,71	7,54	7,28	7,34	7,13	6,44	6,41
$\Delta U_{ЧР}–$, кВ	0,21	0,10	0,18	0,12	0,19	0,22	0,14	0,21
$E_{ср.ЧР–}$, кВ/мм	3,18	3,08	3,02	2,91	2,94	2,85	2,57	2,56
$E_{ЧР–}$, кВ/мм	6,37	5,93	5,55	5,18	5,05	4,79	4,20	4,10
$\Delta E_{ЧР,}$ кВ	2,09	0,93	1	1,04	1,12	1,2	1,46	1,48
$E_{ЧР}+/E_{ЧР–}$	1,32	1,15	1,18	1,20	1,22	1,25	1,34	1,36

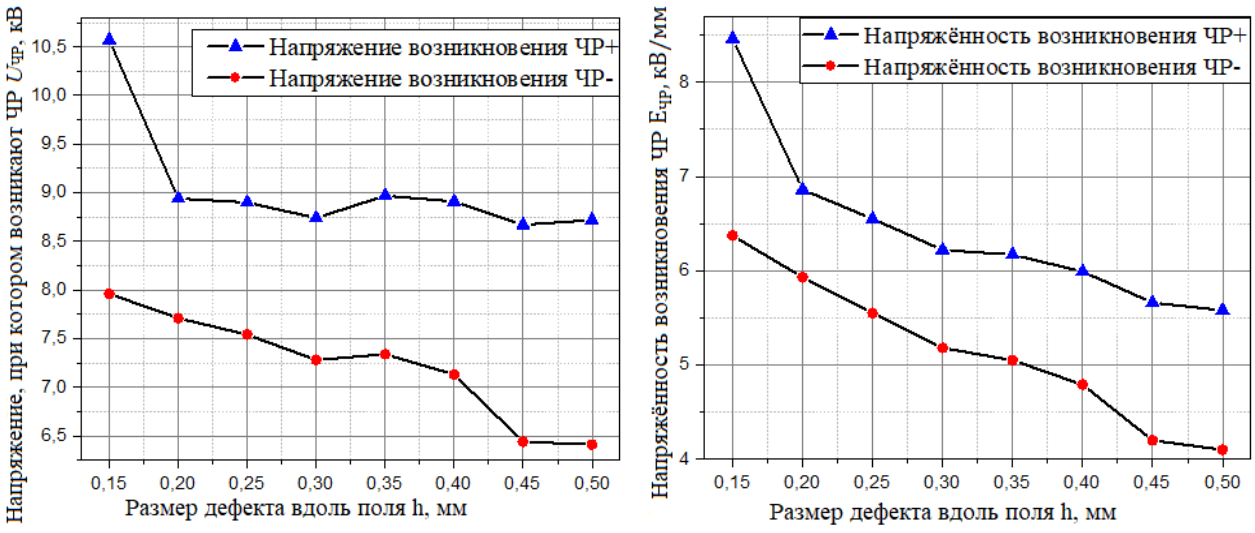
Различие напряжённостей возникновения ЧР в положительном и отрицательном полупериодах синусоиды не получается объяснить несимметричным положением образцов в кювете. Сам дефект расположен в центре образца изоляционных материалов и его грани симметричны и гн иеют различий. В результате разделения зарядов нутри каверны при ЧР и возможной вторичной электронной эмиссии с катодной грани дефекта после окончания первого разряда ЧР часть электронов занимает вакантные орбитали внутри изоляции, а часть оснаётся влизи анодной грани каверны.

Положительные ионы дрейфуют по полю к катодной стороне дефекта, но внутрь изоляции не проникают. Суммарное поле внутри каверны дефекта после ЧР понижается за счёт создаваемого поля разделённых зарядов. Объёмные заряды сосредоточены влизи противоположных сторон каверны и удерживаются в таком положении внешним полем. В центре каверны суммарный объёмны заряд должен быть равен нулю. Силы, удерживающие положительные ионы и электроны в пространстве каверны пропорциональны приложенному полю. При уменьшении внешнего поля после прохода через максимум внешнего напряжения эти силы уменьшаются и область объёмных зарядов расширяется, а заряды частично начинают рекомбинировать. При проходе внешнего напряжения через ноль, эти силы исчезают и происходит полная рекомбинация частиц объёмного зарада внутри объёма каверны в течение времени порядка мкс. Электроны, связанные с вакантными местами изоляции и образуюшие поверхностный заряд, частично или полностью могут оставаться. Процесс симметричен относительно напряжения, а грани дефекта изнаяально имеют одинаковую структуру. Наблюдаемое различие может быть объяснено дополнительными полями, накладывающимися на поле поверхностных электронов. Поскольку заряды на обкладках конденсаторов в столбике с дефетом одинаковы, то на противоположной стороне конленсатора «анодная грань дефекта – поверхность защитной изоляции» (расстояние h_1 на рис. 3.2, а) за счёт электрической индукции (поляризации молекул изоляции – быстрый процесс) увеличивается положительный заряд. В конденсаторе «поверхность защитной изоляции – электрод» изменение плотности зарядов должно происходить за счёт физического перемещения носителей заряда (электростатическая индукция). Электроды не симметричны в этом отношении. Один электрод (высоковольтный) соединён с источником питание через сопротивление порядка единиц мОм, а другой – заземлённый, через измерительное сопротивление 1 кОм. Постоянная времени изменения напряжения на конденсаторах, соприкасающихся с такими электродами отличается на 5–6

порядков. Возможно, что наблюдаемая разница напряжённостей обусловлена таким различием в установлении равновесных значений напряжённости на ёмкостях с высоковольтным и заземлённым электродами и справедлива только для таких электродных систем.

Так как напряжённость воникновения ЧР в отрицательном полупериоде меньше, чем в положительном, то к моменту разряда в отрицательном полупериоде вблизи поверхности катодной стороны дефекта остаётся отрицательный заряд, который создаёт дополнительное поле, которое совпадает по знаку с внешним полем. Считая, что все электроны находятся непосредственно на поверхности дефекта, а разность напряжённостей равна E = 1 кВ/мм, можно оценить среднее число электронов на поверхности. Поверхностная плотность (σ) равна произведению напряжённости на электрическую постоянную, т. е. $\sigma = 8{,}85*10^{-6}$ Кл/м^2. При диаметре дефекта 2 мм это даст заряд на катодной стороне 27,8 пКл или $1{,}7*10^{8}$ электронов.

Связь между напряжённостью возникновения ЧР и размером газовых включений в изоляцию представлена на рис. 3.9 по данным табл. 3.6.



а) б)

Рис. 3.9. Экспериментальные зависимости: а – напряжений и б – напряжённостей возникновения ЧР в положительном и отрицательном полупериодах от размера дефекта вдоль поля

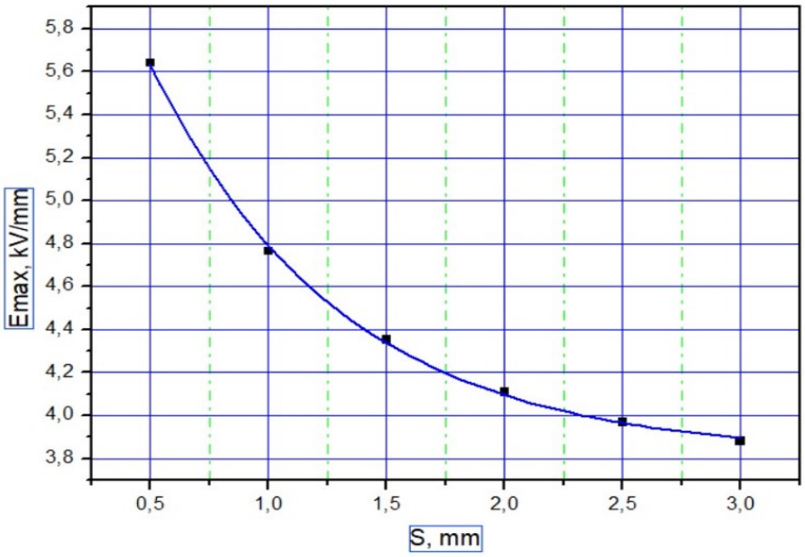


Рис.3.10. Зависимость разрядной напряжённости в электродной системе с двумя шаровыми разрядниками диаметром 5 см от расстояния межлу шарами

Измеренные значения пробивных напряжённостей в табл. 3.6 и на рис. 3.9 сравнивались с результатами измерения пробивных напряжений, выполненных различными авторами в разные годы на разных электродных системах. Результаты сравнения помещены в табл. 3.7. Видно, что прослеживается явное соответствие между зависимостями пробивных напряжённостей и напряжённостей возникновения ЧР от размеров газовых промежутков вдоль силовых линий электрического поля.

Таблица 3.7. Сравнение напряжённостей возникновения пробоя и ЧР

h, мм	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$E_{чр}$,кВ/мм	8,46	6,86	6,55	6,22	6,17	5,99	5,66	5,58
E_{br1}, кВ/мм [92]	7.27^2	6,8	6.46	6.2	6.0	5.8	5,64	5.5
E_{br2}, кВ/мм шары 5 см [33, 103]	6.62	6.45	6.29	6.14	6.0	5.86	5.74	5,64
E_{br3}, кВ/мм [27]	7.93	7.2	6.7	6.32	6.04	5.8	5.61	5.45
E_{br}, кВ/мм [45]	10.89	10.1	9.68	9.3	9.0	8.78	9.56	8.4

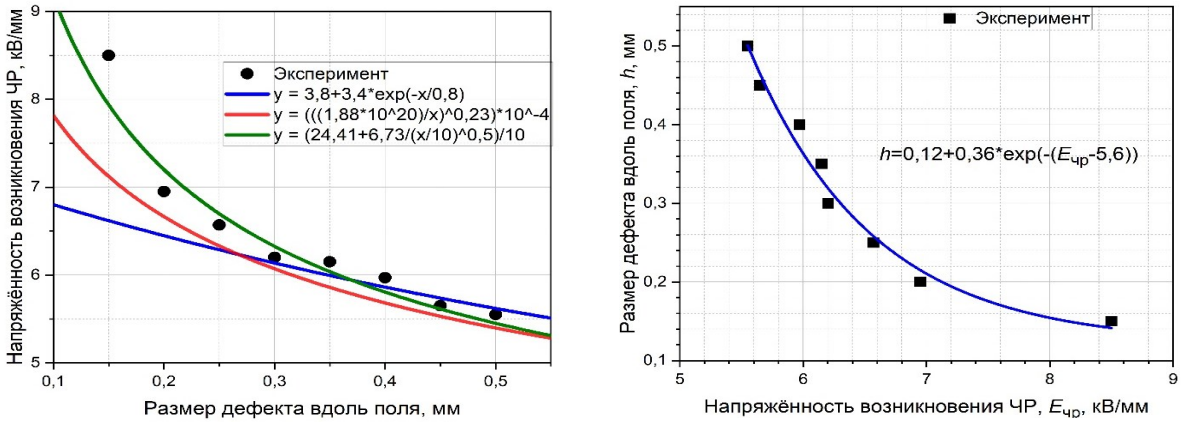
– $Ечр = Кн * \frac{U_{ЧР}}{d}$, кВ/мм, по экспериментам диссертации [103]

– $E_{br1}(z)=\left(1.88 * \frac{10^{20}}{z}\right)^{0.23} \cdot 10^{-4}$ напряжённость (кВ/мм) [92], z в мм

– $E_{br2}(z)= 3,8+3,4*\exp((-z)/0,8)$, для шаровых разрядников [33, 103]

– $E_{br3}(z) = 24{,}41+6{,}73*\sqrt{1/z}$, кВ/см, z в см

Графическое представление данных табл. 3.7 показано на рис. 3.11.



а) б)

Рис. 3.11: а – зависимость $E_{чр}$ от размера дефекта h; б – нахождение h по $E_{чр}$

Полученная из экспериментальных данных функциональная связь напряжённости ЭП, при которой возникают ЧР в газовых дефектов изоляции на положительном полупериоде, и их размера вдоль силовых линий хорошо согласуется с известными из литературы данными по пробивным напряжённостям при атмосферном давлении в квазиоднородных электрических полях. Само существование такой связи для ЧР внутри газовых дефектов позволяет утверждать, что остающийся после предыдущего ЧР в отрицательном полупериоде объёмный заряд, не оказывает заметного изменения ЭП, создаваемого внешними полями в случаях отсутствия проводящих включений на внутренней поверхности каверны дефекта.

На основании проведённых измерений можно сформулировать алгоритм определения размеров газовых дефектов вдоль электрического поля. Алгоритм состоит в следующей последовательности действий: – расчёт ЭП в изоляции и определение коэффициента неоднородности ЭП возможных типов дефектов; – измерение напряжения возникновения ЧР в положительном полупериоде; – определение средней напряжённости ЭП в момент возникновения ЧР; – определение напряжённости ЭП в дефекте при

ЧР; – определение размера дефекта (h) вдоль силовых линий поля по полученной экспериментальной формуле для диапазона размеров дефектов от 0,15 до 0,5 мм:

$$h = 0{,}12 + 0{,}36 \cdot \exp(5{,}6 - E_{\text{ЧР}}), \qquad (3.15)$$

где h – размер дефекта вдоль поля в мм, $E_{\text{ЧР}}$ – напряжённость возникновения ЧР в каверне дефекта в кВ/мм, средняя погрешность апроксимации экспериментальных данных по (3.15) равна 0,015 мм.

Суммарная погрешность определения размеров по приведённой методике при учёте неопределённости формы дефекта и места его возникновения может доходить до 50% от полученной по (3.15) величины.

Если считать, что размер дефекта по полю, при котором ещё не происходит сквозного пробоя изоляции составляет половину её толщины, то можно определить минимальный фазовый угол, при котором ЧР могут ещё наблюдаться к изоляции. При меньших значениях фазового угла должен возникать сквозной пробой, а не ЧР, Если ЧР всё же наблюдаются, при фазовых углах меньще минимально возможного, то это означает, что они возникли в другой фазе оборудования или это разряды не от газовых дефектов. Возможность наблюдать ЧР при малых фазовых углах без привлечения концепции объёмного заряда показана на рис. 3.12.

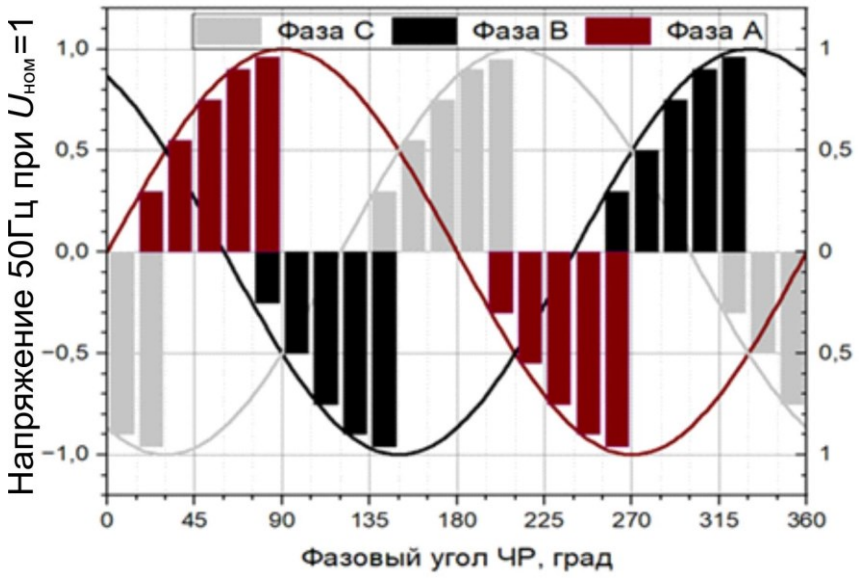


Рис. 3.12. Допустимые фазовые углы возникновения ЧР

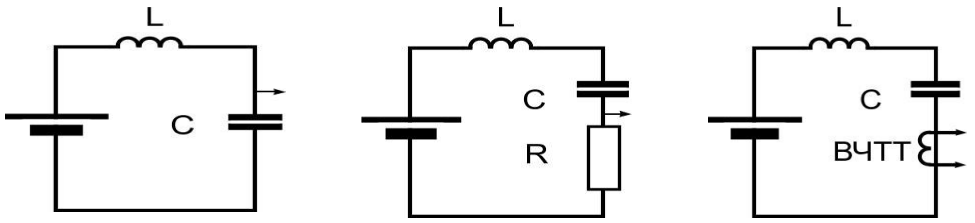
На рис. 3.12 такой минимальный угол принят за 15° в каждой фазе. При таком допущении ЧР в каждой фазе могут наблюдаться в диапазоне углов 15–90° и 195–270°. На датчик ЧР, поставленный в фазе «А», например, могут приходить ЧР из других фаз, отображая на АФД этой фазы диапазон фазовых углов ЧР от 0° до 360°. В первой четверти фазы «А» возможно наблюдение ЧР, приходящих из фазы «С», до фазовых углов 30° и из фазы «В» – в районе 90°. В третьей четверти картина аналогичная. Во второй и 4–ой четвертях возможны ЧР из фазы «В» в диапазоне углов 90°–150° (270°–330°) и из фазы «С» в диапазоне углов 135°–180° (315°–360°).

Такая возможность обнаружения в датчике какой-либо фазы ЧР, возникших в других фазах оборудования, должна учитываться в системах автоматизированной обработки ЧР. При расчёте минимально возможного фазового угла ЧР в электротехническом устройстве придётся учитывать конструкцию изоляции этого устройства [121].

3.3.1. Расчёт характеристик переходного процесса

Возникновение частичных разрядов в дефекте изоляции приводят к изменению ёмкости изоляции, броску напряжения и возникновению переходного процесса. В модели ЧР предполагается, что изменение ёмкости происходит мгновенно или за такой малый промежуток времени, что им можно пренебречь. Как описывалось ранее, это время можно принять равным тройному времени пробега лавины в каверне газового дефекта, что имеет порядок единиц наносекунд. Восстановление напряжения на изоляции до величины, равной напряжению до ЧР происходит за более длительный промежуток времени, которое может доходить до десятков микросекунд. Любое изменение конфигурации электрической системы приводит к возникновению переходного процесса. Амплитуда этого процесса равна броску напряжения при ЧР. Бросок напряжения (dU) является важной измеряемой характеристикой ЧР. Она связана с величиной изменения ёмкости

объекта при ЧР, которая зависит от продольных и поперечных размеров каверны дефекта. На частоте 50 Гц за время ЧР напряжение источника питания изменяется на десятые доли вольта, так что можно считать, что ЧР происходят при постоянном напряжении. В разных работающих электротехнических устройствах ЧР измеряют контактным электрическим методом по одной из схем рис. 3.13.



а) б) в)

Рис. 3.13. Принципиальные схемы измерения ЧР: а – измерения ВН на ёмкости; б – измерение напряжения на датчике; в – измерение тока в цепи заземления

В схеме на рис. 3.13 измеряется изменение напряжения на высоковольтной стороне изолятора (конденсатора С) через разделительный конденсатор. В схемах на рис. 3.13, б и в измеряется зарядный ток конденсатора С высокочастотным трансформатором тока (ВЧТТ) или по падению напряжения на измерительном сопротивлении *R*. При измерении ЧР в лаборатории была использована схема рис. 3.13, б с *R*=1 кОм.

Индуктивность L соответствует индуктивности высоковольтного проводника, питающего ячейку, и составляет порядка нескольких микрогенри.

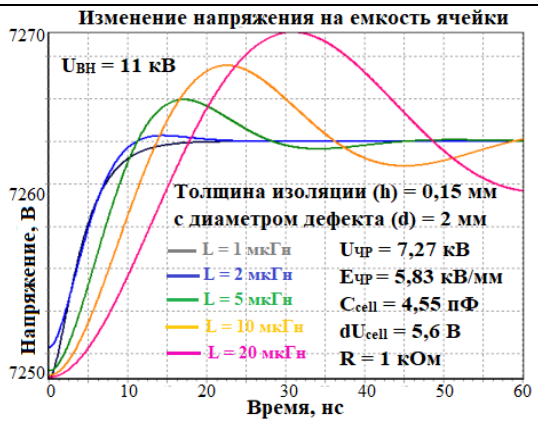
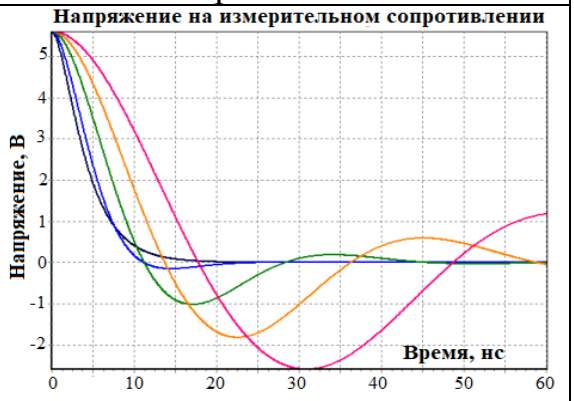
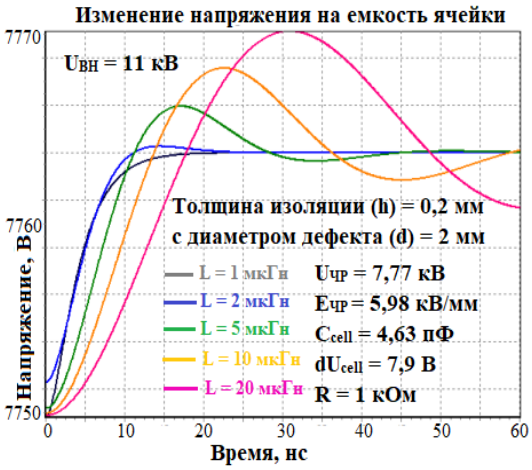
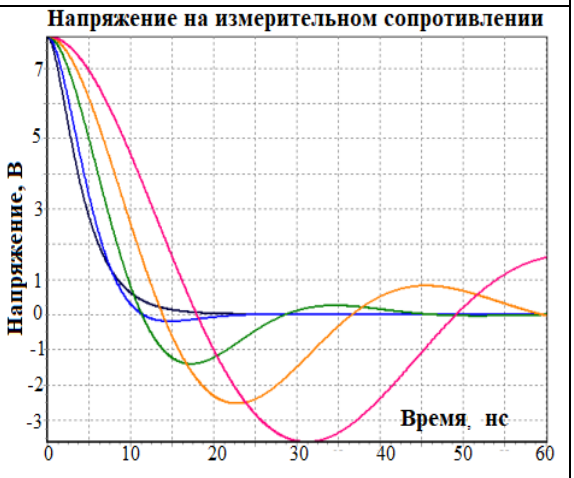
ЧР происходит при напряжении $U_{\text{чр}}$ и его считать установившемся напряжением переходного процесса после его завершения. Начальным напряжением является напряжение меньше установившегося на величину броска $-dU$ при ЧР. Переходной процесс имеет вид [119,122, 139]:

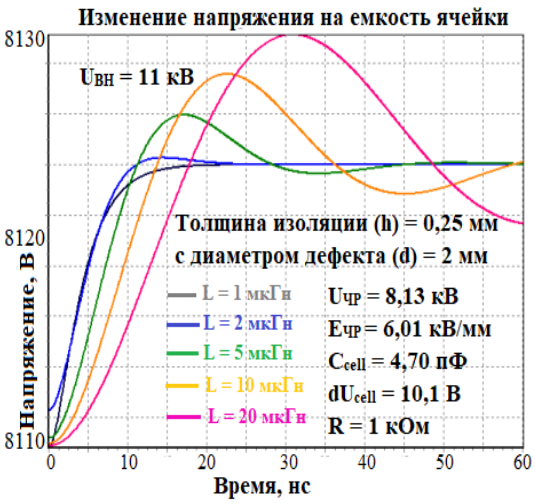
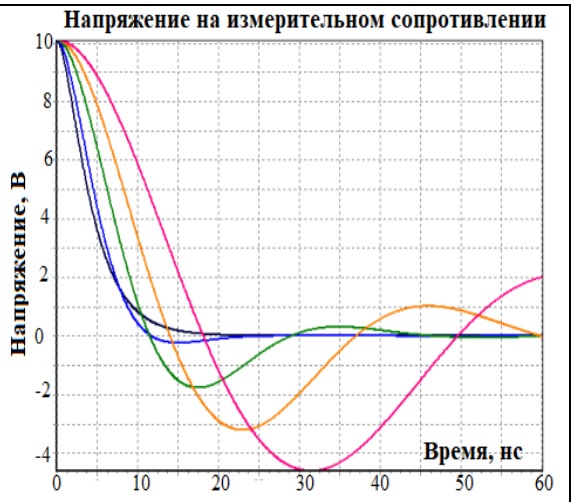
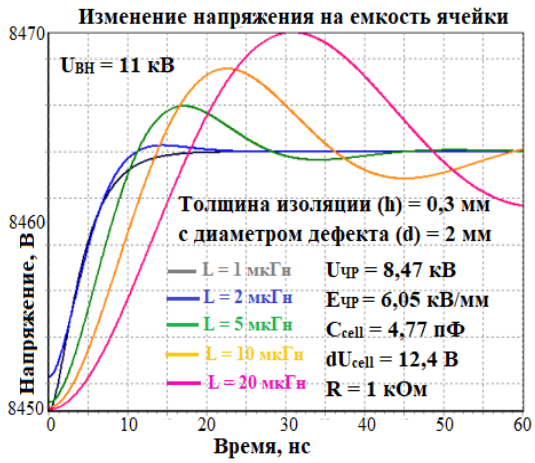
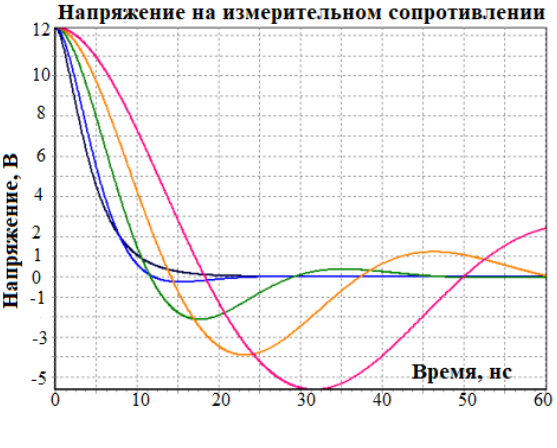
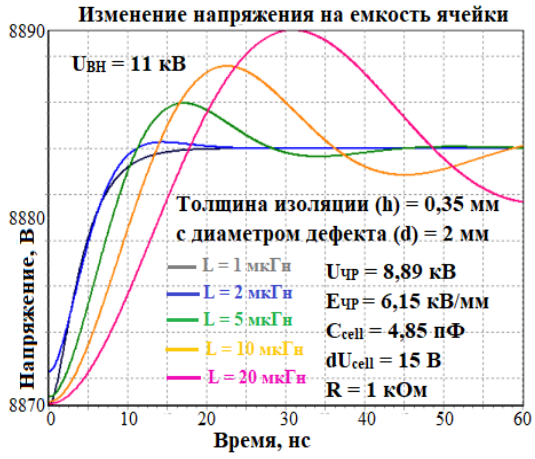
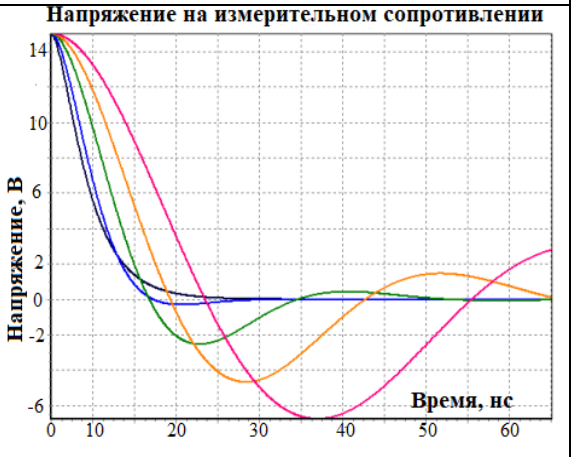
$$U(t) = U_{\text{чр}} - dU_{cell} \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta) \cdot \exp(-\beta \cdot t)\ , \qquad (3.16)$$

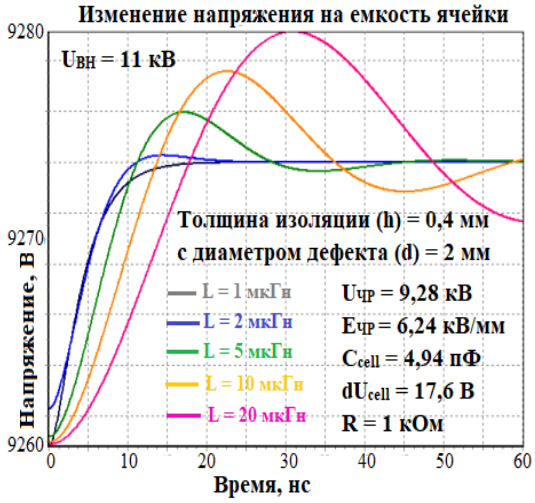
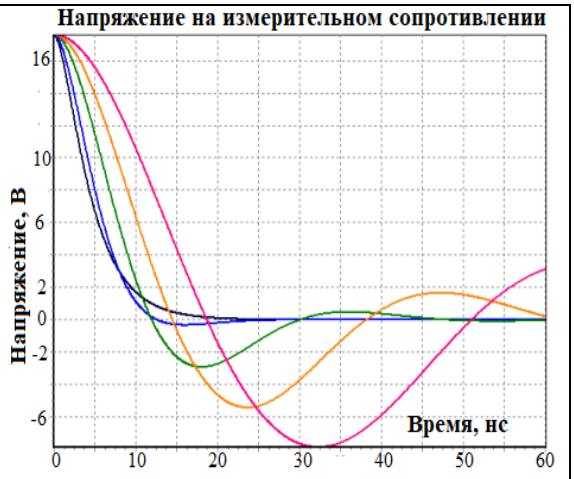
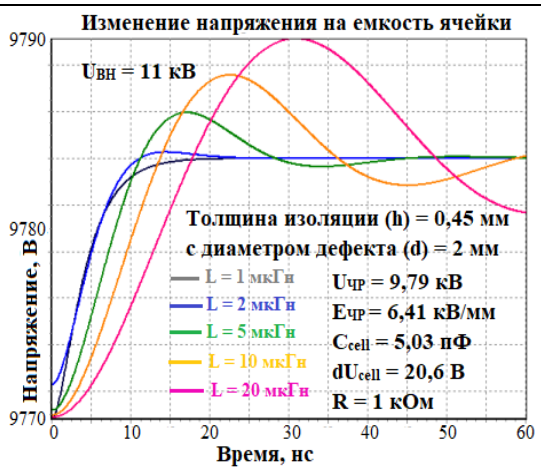
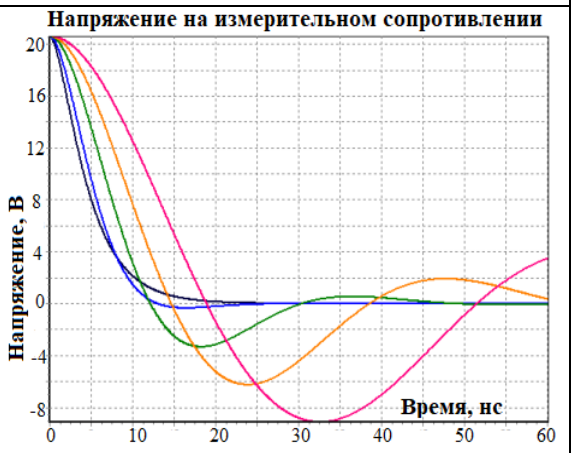
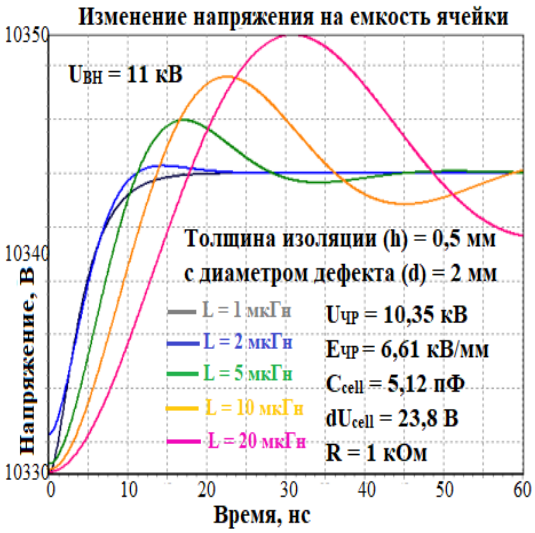
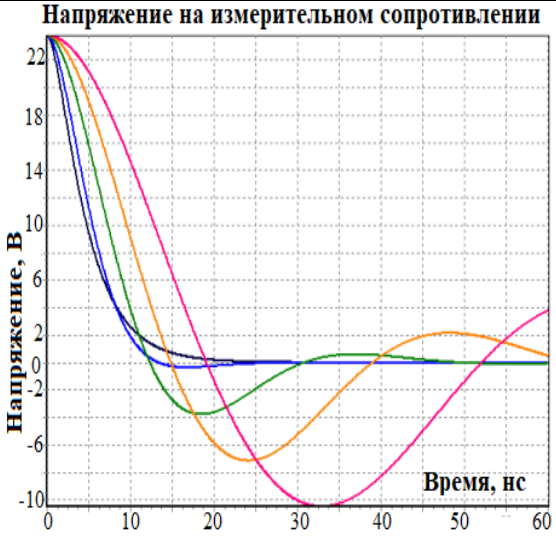
где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$, $\omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$, $\beta = R/(2 \cdot L)$, $\theta = \arctan\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)$

Уравнение (3.16), описывающее колебательный переходной процесс, справедливо при условии $\omega_0 > \beta$, т.е. $\frac{R}{2\sqrt{\frac{L}{C}}} < 1$. Для схемы рис. 3.13 это соответствует условию L>1,3 мкГн. Это условие для наших экспериментов выполняется. Вид изменения напряжения между электродами ячейки, полученный по (3.15) при различных значениях индуктивности L представлен в табл.3.14 для всех образцов .

Таблица 3.8. Переходные процессы в образцах с различными дефектами

h, мм	Напряжение между электродами ячейки	Напряжение на измерительном сопротивлении
0,15		
0,2		

0,25	Изменение напряжения на емкость ячейки $U_{ВН}$ = 11 кВ Толщина изоляции (h) = 0,25 мм с диаметром дефекта (d) = 2 мм L = 1 мкГн L = 2 мкГн L = 5 мкГн L = 10 мкГн L = 20 мкГн $U_{ЧР}$ = 8,13 кВ $E_{ЧР}$ = 6,01 кВ/мм C_{cell} = 4,70 пФ dU_{cell} = 10,1 В R = 1 кОм Напряжение, В Время, нс	Напряжение на измерительном сопротивлении Напряжение, В Время, нс
0,3	Изменение напряжения на емкость ячейки $U_{ВН}$ = 11 кВ Толщина изоляции (h) = 0,3 мм с диаметром дефекта (d) = 2 мм L = 1 мкГн L = 2 мкГн L = 5 мкГн L = 10 мкГн L = 20 мкГн $U_{ЧР}$ = 8,47 кВ $E_{ЧР}$ = 6,05 кВ/мм C_{cell} = 4,77 пФ dU_{cell} = 12,4 В R = 1 кОм Напряжение, В Время, нс	Напряжение на измерительном сопротивлении Напряжение, В Время, нс
0,35	Изменение напряжения на емкость ячейки $U_{ВН}$ = 11 кВ Толщина изоляции (h) = 0,35 мм с диаметром дефекта (d) = 2 мм L = 1 мкГн L = 2 мкГн L = 5 мкГн L = 10 мкГн L = 20 мкГн $U_{ЧР}$ = 8,89 кВ $E_{ЧР}$ = 6,15 кВ/мм C_{cell} = 4,85 пФ dU_{cell} = 15 В R = 1 кОм Напряжение, В Время, нс	Напряжение на измерительном сопротивлении Напряжение, В Время, нс

0,4		
0,45		
0,5		

Экспериментально наблюдаемые ЧР (рис. 3.8) можно отнести к переходному процессу с параметрами $\omega_0 \sim \beta$, что подтверждается расчётами по (3.15). Из табл. 3.8 видно, что амплитуда напряжения на сопротивлении R равна амплитуде броска напряжения на ячейке (dU_{cell})[138]. Измеряя падение

напряжения на сопротивлении в цепи заземления или измеряя бросок тока в этой цепи, мы фактически измеряем бросок напряжения при ЧР на измерительной ячейке. Произведение этого броска на ёмкость объекта даёт величину кажущегося заряда, который является одной из двух основных характеристик одиночного ЧР [123-124]. Форма напряжения зависит от плохо контролируемой величины – индуктивности в цепи между объектом измерения и источником питания. Для измерения этой величины в цифровом виде на подъёме (спаде) нужно измерить минимум 4 значения напряжения, т.е. при приходе импульса ЧР частота дискретизации должно быть порядка 500 МГц. На рис. 3.8, а представлен 1 экран осциллографа. На экране представлен временной интервал 100 мс, состоящий из 5000 тысяч выборок, т.е. время накопления (усреднения) напряжения составляет 20 мкс. При таком времени интегрирования, амплитуде импульса 15 В и длительности первого полупериода колебаний ~15 нс на экране осциллографа он должен иметь амплитуду ~150 мВ, что и наблюдается. Все вышеописанные оценки сделаны в предположении мгновенного пробоя газового промежутка дефекта и нулевом времени перехода объекта из состояния «до ЧР» в состояние «после ЧР». Как упоминалось выше, это время определяется временем лавинообразного нарастания числа свободных электронов в каверне и их распределением в газовой среде вблизи «анодной» грани дефекта до создания нулевого электрического поля внутри полости. Длительность переднего фронта импульса ЧР для нашего случая можно оценить в ~1-3 нс. Наблюдаемая в эксперименте форма импульса ЧР состоит из апериодической составляющей, в которой содержится информация о размерах дефекта, и колебательной составляющей, характеризующей объект испытаний, а не дефект изоляции [125-137].

3.4. Выводы к главе 3

На основании проведённых измерений было установлено, что в дефектах без следов обугливания ЧР происходят только дважды за период напряжения промышленной частоты в 1ой и 3ей четверти синусоиды при одинаковом по модулю напряжении. Из этого экспериментального факта следует, что в таких дефектах на частоте 50 Гц электроны и ионы, образовывающие объёмный заряд в каверне дефекта после ЧР, успевают нейтрализоваться и не оказывают заметного воздействия на последующий ЧР. Для практики интерпретации ЧР в объектах электроэнергетики из этих результатов следуют такие рекомендации:

1. **Зона ЧР на АФД**. ЧР от газовых дефектов, возникших в той же фазе, в которой установлен датчик, могут происходить **только** в диапазоне фазовых углов $\varphi_{min} \div 90°$ в 1й четверти и $180°+\varphi_{min} \div 270°$ в 3й четверти. Значение угла φ_{min} индивидуально для каждого типа оборудования и его можно рассчитать из величины коэффициента неоднородности электрического поля в наибольших по величине дефектах не приводящих ещё к сквозному пробою изоляции.

2. **Парность ЧР**. В изоляции с однородным полем каждому ЧР, возникшему в каверне с газовым дефектом, должен найтись второй ЧР с фазовым углом, отличающимся от угла первого ЧР на 150°–180° с учётом погрешности измерения фазового угла. В изоляции с неоднородным полем различие фазовых углов уменьшается. В неоднородном поле может быть только один ЧР за период, когда для второго не хватает напряженности.

3. **Число ЧР за 1 секунду**. Число ЧР, возникающих в одном газовом дефекте изоляции без металлических включений в поверхности, равно 100 ЧР за секунду и не изменяется в течение 400 часов.

4. ЧР для которых не выполняются 3 первых условия или являются ЧР, возникшими от дефектов в других фазах, или имеют иное происхождение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создана экспериментальная установка с измерительной ячейкой и методика измерений, позволяющая изучать ЧР, возникающие только внутри газовых дефектов образцов диэлектрических материалов.

2. Созданы программы и выполнены расчёты:

– зависимости отношения напряжённостей на катодной и анодной гранях газового дефекта типа цилинд к средней напряжённости от размера дефекта вдоль силовых линий поля (коэффициента необнородности) для дефектов 0,15–1,1 мм в двух различных типах измерительных ячеек («диск–диск и «кювета»), что позволяет определять напряжённость возникновения ЧР по величине напряжения между электродами в момент возникновения ЧР. Различие напряжённостей на гранях при произвольных положениях образца в ячейке типа «кювета» не превышают 4–6%;

– картины распределения напряжённости поля в объёме газового дефекта в изоляции, что позволило определить место возникновения ЧР при повышении напряжения;

– зависимости напряжённости поля в воздухе вблизи электродов цилиндрической формы вдоль границы изоляция–воздух от диаметра электродов и величины приложенного напряжения, что позволило оценить зону возникновения поверхностных ЧР в ячейке типа «диск–диск». в;

– ёмкости электродных систем ячеек «диск-диск» и «кювета» с образцами разной толщины изоляции;

– зависимости характеристик переходного процесса в ячейке «кювета» при различных индуктивностях между источником питания в высоковольтным электродом для образцов тазличной толщины;

- число электронов в головной части одиночной лавины ЧР, размер лавины в плоскости перпендикулярной полю, что позволило оценить длительность переднего фронта ЧР и последовательность сниженя напряжённости в каверне дефекта.

3. В результате статистической обаботки измеренных фаз возникновения ЧР установлен набор признаков, которым обладают частичные разряды, возникающие внутри газовых дефектов изоляционных материалов:

– фазовый угол возникновения ЧР ($f_{ЧР}$) находится в диапазоне $f_{min} < f_{ЧР} \leq 90°$ и $180º+f_{min} < f_{ЧР} \leq 270°$, f_{min} – характеристика изоляции высоковольтного аппарата, уменьшение f_{min} – рост дефекта;

– ЧР должен быть двойным с различием фаз $df_{ЧР} = 150–180°$ возникновения ЧР в разных полупериодах синусоиды;

– число ЧР в одном дефекте должно равняться 100 за 1 секунду и слабо зависеть от времени.

- частичные разряды, возникающие в газовых дефектах без проводящих включений внутри изоляции с размерами вдоль поля от 0,15 мм до 0,5 мм при напряжениях, соответствующих напряжениям на изоляции электротехнических устройств до номинального, происходят по одному разу в четвертях синусоиды промышленной частоты, в которых модуль напряжения возрастает, т.е. частота ЧР для одиночного равна 100 Гц;

- для каждого типа изоляционного материала существует минимальный фазовый угол, менее которого не могут возникать ЧР, зависящий как от свойств материалов, так и геометрии изоляционной конструкции.

4. Обнаружено, что напряжённость возникновения ЧР в отрицательном полупериоде в установке с ИЯ «кювета» и датчиком ЧР в цепи заземленя ИЯ (активное сопротивление 1 кОм) меньше по модулю на 1-2 кВ/мм, чем в положительном полупериоде, а их отношение практически посоянно и не зависит от размера дефекта. Различие составляет 15–35 %, что превышает погрешность измерений. Это объяснено несимметрией измерительной системы к перераспределению зарядов на поверхностях всоковольтного и заземлённого электродов с точки зрения электростатической индукции

5. Создана новая методика оценки размеров газовых дефектов в изоляционных материалах по характеристикам частичных разрядов. Методика состоит в следующей последовательности действий:

– расчёт коэффициента не-однородности ЭП внутри возможных типов дефектов;

– измерение напряжения возникновения ЧР в положительном полупериоде;

– определение средней напряжённости ЭП в момент возникновения ЧР;

– определение напряжённости ЭП внутри каверны дефекта при возникновении ЧР;

– определение размера дефекта вдоль силовых линий поля.

Аппроксимацией результатов измерений напряжения возникновения ЧР и моделирования электрического поля в дефектах получена экспериментальная формула (3.15) зависимости напряжённости возникновения ЧР от размеров дефектов в диапазоне от 0,15 мм до 0,5 мм.

В качестве перспектив дальнейшей разработки темы диссертационного исследования может быть рекомендовано исследование характеристик ЧР в дефектах с проводящми включениями на стенках каверн и экспериментальное подтверждение или опровержения выдвинутой гипотезы по объяснению причин различия напряжений возникновения ЧР в положительном и отрицательном полупериодах синусоиды.

РАБОТЫ АВТОРА, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемом научном издании из перечня ВАК РФ (К2):

1. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю. Измерительная ячейка для изучения характеристик частичных разрядов в газовых дефектах изоляции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. № 27 (3). С. 14-22. DOI: https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-14-22.

2. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю. Исследование характеристик частичные разрядов в одиночном воздушном дефекте изоляции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2026. № 28 (4). С. 96-107. DOI: https://doi.org/10.30724/1998-9903-2026-28-4-96-107.

Свидетельство:

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026669962. Программа расчета параметров частичных разрядов в газовых дефектах изоляции высоковольтного электрооборудования // Ньетерейе Фредерик, Усачев Александр Евгеньевич, Кубарев Артём Юрьевич. Дата регистрации: 10.07.2026.

Статья в прочем рецензируемом издании:

4. Nyetereye Frederic, Usachev Alexander Evgenievich, Kubarev Artyom Yuryevich. Development of methods for measuring partial discharges in the solid insulation with gaseous defects of power transformers // Journal of Electrical Systems and Information Technology (JESIT). 2026. Vol. 13. article number 28. DOI: https://www.doi.org/10.1186/s43067-026-00333-1.

Работы в материалах конференций:

5. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е. Диагностика силовых трансформаторов методом частичных разрядов // Материалы докладов XXVI

Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященный «Дню энергетика», г. Казань, КГЭУ, 2022, Т. 1, с. 23-26.

6. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е. Частичные разряды в масле силовых трансформаторов// Материалы докладов в Конференции технологического суверенитета и цифровой трансформацией (Международная научно-техническая конференция), г. Казань, КГЭУ, 2023, Т. 28, с. 19-22.

7. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е. Расчёт радиальной напряженности электрического поля на поверхности диэлектрического барьера измерительной ячейки// Материалы докладов XXVII Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященный «Дню энергетика», г. Казань, КГЭУ, 2023, Том 1, с. 33-36.

8. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е. Моделирование коронного разряда в воздухе при атмосферном давлении // Материалы докладов Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2024 «Энергетика и цифровая трансформация», г. Казань, КГЭУ, 2024, Том 1, с.43-46.

9. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Бобоев Ш.А. Ячейка для измерения характеристик частичных разрядов во внутренних дефектах изоляции // Материалы докладов XXVIII Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященный «Дню энергетика», г. Казань, КГЭУ, 2024, Том 1, с.19-22.

10. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Бобоев Ш.А. Моделирование частичных разрядов внутри дефектов изоляции помощью comsolmultiphysics // Материалы докладов Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2025 «Энергетика и цифровая трансформация», г. Казань, КГЭУ, 2025, Том 1, с.879-882.

11. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Бобоев Ш.А. / Исследование распределения электрического поля и частичных разрядов в твердой изоляции силовых трансформаторов помощью COMSOL Multiphysics// Материалы докладов XII Международной научной четаевской конференции

«аналитическая механика, устойчивость и управление», г. Казань, КНИТУ-КАИ, 2025, Том II, с. 270-274.

12. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е., Бобоев Ш.А. Анализ частичных разрядов в повреждениях твердой изоляции силовых трансформаторов// Материалы докладов XXIX Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященный «Дню энергетика», г. Казань, КГЭУ, 2025, Том 1, с.48-51.

13. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е. Моделирование и измерение частичных разрядов в дефектах твердой изоляции // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования: материалы международной научно-практической конференции, Казань, 2026, с. 827-831.

14. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е. Параметры частичных разрядов в газовых дефектах высоковольтной изоляции // Материалы докладов Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2026 «Энергетика и цифровая трансформация», г. Казань, КГЭУ, 2026, Том 1, с. 879-882.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. // Л.: Энергия, Ленингр. отделение, 1979, 224с.

2. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования // Новосибирск: Наука. - 2007. – 155с.

3. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного электрооборудования // Екатеринбург: УрГУПС. - 2011.

4. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов // М.: Изд-во стандартов 2008.

5. IEC 60270:2000(E). High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. IEC, publ. 270, 2000, 49 p.

6. ГОСТ Р55191 (МЭК 60270). Методы высоковольтных испытаний. Измерение частичных разрядов // М.: Изд-во стандартов 2000-12.

7. Никандров Д.С., Цендин Л.Д. Низкочастотный барьерный разряд в таунсендовском режиме. // ЖТФ, 2005. т.75. в.10. с.29-38.

8. Александров Г.А., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю. Ионизация воздуха в околокритическом электрическом поле. / Александров Г.А., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю. // ЖТФ, 2006, т.76, в.3. с.38-43.

9. Kozlov K.V., Brandenburg R., Wagner H.-E., Morozov A.M., Michel P. Investigation of the filamentary and diffuse mode of barrier discharge in N2/O2 mixtures at atmospheric pressure by cross-correlation spectroscopy // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V.38. P.518-529.

10. Baboraik A., Usachev A. New model of explanation for phase angle pattern of online partial discharge measurement in winding insulation of turbine generator // J. Electrical engineering, vol. 72 (2021), n.1, 66–77.

11. Кубарев А.Ю., Усачев А.Е., Лопухова Т.В. Методика обнаружения опасных зон в изоляции кабельных линий по характеристикам частичных

разрядов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – №1 – 2. - С. 79–83.

12. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 2 — 4-е изд. / Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.. // СПб.: Питер, 2003 Питер, 2003 — 576 с.: ил.

13. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. Effect of surface charge distribution on the electric field in a void due to partial discharges // Electrical Insulating Materials (ISEIM), Proceedings of 2011 International Conference on. – IEEE, 2011. – С. 245-248.

14. Сканави Г.И., Физика диэлектриков (область сильных полей) // М.: ГИФМЛ. - 1958.

15. Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильных полей).

16. Бортник И.М., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов. 1993. 543 с .

17. Jain A., Pachori A. A. Review Partial Discharge Activity in Electrical Insulation // International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering. – 2013. – Т. 2. – №. 1. – С. 78-82.

18. Meggs R. W., Daffey K., Partial Discharge Monitoring in Marine HV Systems. – 2011.

19. Kreuger F. H., Gulski E., Krivda A., Classification of partial discharges //IEEE transactions on Electrical Insulation. – 1993. – Т. 28. – №. 6. – С. 917-931.

20. Nathaniel Taylor. A literature review: The nature of partial discharges in stator insulation. ETK, KTH. September 2008. p34.

21. Raymond W. J. K. et al. Partial discharge classifications: Review of recent progress // Measurement. – 2015. – Т. 68. – С. 164-181.

22. Bolliger A., Lemke E. PD Diagnostics-its history and future // PD Workshop. – 2001.

23. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Диагностика силовых трансформаторов методом частичных разрядов // Материалы докладов XXVI Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященный «Дню Энергетика», г. Казань, КГЭУ, 2022, Т. 1 с.23-26.

24. Шахнин В.А., Чебрякова Ю.С., Мироненко Я.В. Аппаратный анализ и моделирование статистических характеристик частичных разрядов для интродиагностики высоковольтного оборудования // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 1. С. 10-16.

25. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. М. : ЭНАС, 2002.

26. РД 153-34.0-20. 363-99 (СО 34.0-20.363-99) Основные положения методики инфракрасной диагностики электроборудования и ВЛ.

27. Pan C. et al. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.–2019.–v.26.–n.3.– pp. 981-1000.

28. ГОСТ 20415-82 АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ: Общие положения.

29. РД 153-34.0-46.302-00 (СО 34.46. 302-00). Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле.

30. РД 34.46.303-98 (СО 34.46.303-98). Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов.

31. Оснащение объектов электроэнергетики системами мониторинга и диагностики высоковольтного оборудования,© bo-energo.ru 2005-2020.

32. Аксенов Ю.П., Аксенов Д.Ю., Прошлецов А.П., Ярошенко И.В. (ЗАО «ДИАКС»): Техническое диагностирование силовых трансформаторов с измерениями вибрационных характеристик.

33. ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кв и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением. – Москва. ИПК Издательство стандартов, 2003. –22 с.

34. CEI 60270-2000-12. Методы испытаний высоким напряжением - Измерение частичного разряда.

35. Долин А.П., Ленякин А.В., Цветаев С.К. НПО "Техносервис-Электро" (г. Москва); Акустический контроль трансформаторов.

36. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е., Частичные разряды в масле силовых трансформаторов // Материалы докладов в Конференции технологического суверенитета и цифровой трансформацией (Международная научно-техническая конференция), г. Казань, КГЭУ, 2023 г., Т28 с.19-22.

37. Техническая брошюра PDL 650 - OMUCRON: Акустическая локализация повреждений частичных разрядов в высоковольтном оборудовании.

38. Ндайизейе Мартин, Усачев А. Е., Контроль состояния обмоток силовых автотрансформаторов и трансформаторов напряжения методами частотного анализа и резистивных измерений, Казань – 2016.

39. Киреев С.И., Диагностика частичных разрядов высоковольтной изоляции на основе анализа коммутационных процессов.

40. Fromm U. and Gulski E. “Statistical behaviour of internal partial discharges at DC voltage,” in Properties and Applications of Dielectric Materials, 1994., Proceedings of the 4th International Conference on, 1994, vol. 2, pp. 670–673.

41. Fouracre R. A., Santos E., Timoshkin I., Given M. J., and MacGregor S. J. Surface Discharge Propagation: The Influence Of Surface Charge, in Power Modulator Symposium, 2006. Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International, 2006, pp. 39–42.

42. Lemke E., Berlijn S., Gulski E., Muhr M., Pultrum E., Strehl T., Hauschild W., Rickmann J., and Rizzi G. Guide for partial Discharge measurements in compliance to IEC 60270, CIGRE Work. Gr. D1.33, 2010.

43. Gulski E., Strehl T., Muhr M., Tenbohlen S., Meijer S., Judd M. D., Bodega R., Lemke E., Jongen R. A., Coenen S., Larzelere B., Hanai M., and Agoris P., Tech Brochure 444 - Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements, CIGRE Work. Gr. D1.33, 2010.

44. ГОСТ 30830-2002. Трансформаторы силовые, часть I - общие положения (МЭК 60076-1-93).

45. Месяц Г. А., Законы подобия в импульсных газовых разрядах. – УФН, 2006, т.176, в.10. с.1069–1091.

46. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е. Расчёт радиальной напряженности электрического поля на поверхности диэлектрического барьера измерительной ячейки // Материалы докладов XXVII Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященный «Дню Энергетика», г. Казань, КГЭУ,2023 г., Том 1 с.33-36.

47. РД 34.45-51.300-97: Объем и нормы испытаний электрооборудования // Под общ. ред. Алексеева Б.А., Когана Ф.Л., Мамиконянца Л.Г., - 6-е изд., с изм. И доп. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.

48. ГОСТ 20243-74. Трансформаторы силовые. Методы испытаний на стойкость при коротком замыкании. М.: Изд-во стандартов, 1974.

49. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Преимущества и недостатки метода акустической диагностики силовых трансформаторов// Материалы докладов XXV Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященный «Дню Энергетика», г. Казань, КГЭУ, 2021 г., Том 1 с.25-28.

50. Zhao, L.Y.; Huankun Zheng, H.K., Voltage Stability Analysis for AC/DC Conference on Electronics Technology, Chengdu, China, 10–13 May 2019.

51. Gu X., Xu Y., Yan Y. and Zhao P. Partial discharge in a cylindrical cavity in XLPE under DC voltage: Simulation and experiment, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 26, no. 6, pp. 1831-1839, 2019.

52. Шаврук Олеся Константиновна. Численное решение задачи о расчете пространственного распределения потенциала электрического поля в поперечном сечении связанных микрополосковых линий, 2019.

53. Hanson R.E., Dielectric Material Degradation Monitoring of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. J Appl Phys.2014, 115(4), 043301(1–9).

54. IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment. IEEE Std 400.3™-2006. DOI:10.1109/ ieeestd.2007.305045.

55. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Шемет М.В. Исследование одиночного барьерного разряда в субмиллиметровых воздушных промежутках. Неоднородное поле // ЖТФ. 2014, 84(8), 21–29.

56. Lech W., Tuminski L. Detecting transformer winding damage by the low voltage impulse method // Electrical review (ERA Translation). 1966. V.179, № 21. P. 19-23.

57. Гуськов А.А., Алексеева Р.Е. Физические явления и эффекты в электромагнитных полях: учеб.пособие / Нижегород. гос. тех. ун-им.– Нижний Новгород, 2018. – 164 с.

58. Семенов Ю.С. Математическая модель индуктивной измерительной ячейки для бесконтактной кондуктометрии, ТРУДЫ МФТИ-2012-ТОМ 4.

59. Важов В. Ф., Лавринович В. А. Техника высоких напряжений.

60. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Шемет М.В. Исследование одиночного барьерного разряда в субмиллиметровых воздушных промежутках. Однородное поле.

61. Гусев Ю.А., Основы диэлектрической спектроскопии.

62. Викторович С.А., Константинович С.Ю. Компьютерное моделирование очаговой формы коронного разряда. 2013.

63. Стишков Ю. К., Самусенко А.В. Компьютерное моделирование коронного разряда в инертном газе, 2008.

64. Райзер Ю.П., Физика газового разряда. М.: "Наука", 2018

65. Андроников Игорь Владимирович, Евтушенко. Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс, 2013.

66. Анисовна С.А., Электрофизические и кинетические характеристики неравновесной плазмы барьерных и коронных разрядов, 2021.

67. Овсянников А.Г., Коробейников С.М. Контроль изоляции по частичным разрядам (исторический экскурс). № 2 (65) 2021.

68. Refaat S. S., Shams M. A., A review of partial discharge detection, diagnosis techniques in high voltage power cables // 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/CPE.2018.8372608.

69. Каныгина О.Н., Бердинский В.Л., Анисина И.Н., Четверикова А.Г. Физико-химические процессы синтеза алюмосиликатной керамики: учебное пособие для самостоятельной работы. Оренбургский гос. ун –т. Оренбург : ОГУ, 2016. – 106 с. ISBN 978-5-7410-1620-6.

70. Шаврук Олеся Константиновна. Численное решение задачи о расчете пространственного распределения потенциала электрического поля в поперечном сечении связанных микрополосковых линий, 2019.

71. Hanson R.E., Dielectric Material Degradation Monitoring of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. J Appl Phys. 2014, 115(4), 043301(1–9).

72. Бортник И.М., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов.Энергоатомиздат, 1993. 543 с.

73. Митрофанов С.В., Еремеев И.К. Методика проведения инфракрасной диагностики силового трансформатора.

74. Макаров А.М., Лунева Л.А. Электростатическое поле в вакууме, Уравнение Пуассона для потенциала и электростатического поля. Понятие о краевых задачах в теории потенциала и методах их решенияб, 2002. МГТУ им. Н.Э.Баумана.

75. Бобрик Л. И., Михайлов В. Н., Решение некоторых задач для уравнения пуассона с граничными условиями iv рода.

76. Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И.; Физика диэлектриков (область сильных полей).

77. Hanson R.E. Dielectric Material Degradation Monitoring of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators. J Appl Phys. 2014, 115(4), 043301(1–9).

78. Ндайизейе М., Ильдарханов Р.Г., Усачёв А.Е. Статистический анализ амплитудно-частотных характеристик обмоток силовых трансформаторов в эксплуатации // Известия высших учебных заведений Проблема энергетики. 2015г, № 1-2, с 103-107.

79. Ба Бораик А. М., Усачёв А. Е. Контроль состояния изоляции обмоток статоров турбогенераторов методом частичных разрядов, Казань – 2017.

80. Климов Д. А. Математическое моделирование динамических режимов работы силовых трансформаторов для автоматизированного проектирования и диагностики: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12 Иваново, 2007 143 с. РГБ ОД, 61:07-5/2245.

81. Сунихин А.А., Жаворонков М.А., Аппараты высокогонапряжения // «Энергоматиздат» 1985г -432с. ил.

82. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е., Моделирование коронного разряда в воздухе при атмосферном давлении // Материалы докладов Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2024 «Энергетика и цифровая трансформация», г. Казань, КГЭУ, 2024 г., Том 1 с.43-46.

83. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии (Учебное пособие).

84. Брахмиа А., Сачи А. Исследование влияния изоляционного барьера на диэлектрическую жесткость воздуха, Академический магистр, 2013.

85. Фатиха Талби. Исследование явлений проводимости и разрушения в керамике с высоким содержанием глинозема, Докторская диссертация, УММТО (2010).

86. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е., Бобоев Ш.А. Ячейка для измерения характеристик частичных разрядов во внутренних дефектах изоляции // Материалы докладов XXVIII Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященный «Дню Энергетика», г. Казань, КГЭУ, 2024 г., Том 1 с.19-22.

87. Рефаат С.С., Шамс М.А., Обзор методов обнаружения частичных разрядов и методов диагностики в силовых кабелях высокого напряжения // 12-я Международная конференция IEEE по совместимости, силовой электронике и энергетике, 2018 г. (CPE-POWERENG 2018). 2018. С. 1–5. DOI: 10.1109/CPE.2018.8372608.

88. Гу С., Сюй Ю., Ян Ю. и Чжао П. Частичный разряд в цилиндрической полости из сшитого полиэтилена под напряжением постоянного тока: моделирование и эксперимент, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 26, нет. 6, с. 1831-1839, 2019 г.

89. Шэнтао Ли., Цзяньин Ли. Мониторинг состояния и диагностика энергетического оборудования: обзор и перспективы. // Высокое Вольт., 2017, Том. 2 Вып. 2, с. 82-91.

90. Стоун G.C., Диагностика частичного разряда и оценка состояния изоляции электрооборудования, IEEE Trans. Диэлектр. Электр., 2005, 12, (5), с. 891–904.

91. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L., Effect of surface charge distribution on the electric field in a void due to partial discharges // Electrical

Insulating Materials (ISEIM), Proceedings of the 2011 International Conference on. - IEEE, 2011. - C. 245-248.

92. Alexandrov A.F., Bychkov V.L., Grachev L.P., Esakov I.I., Lomteva A.Yu., Ionization of air in near-critical electric field. // ZhTF, 2006, vol. 76, v.3, p.38-43.

93. Mesyats G. A. Similarity laws in pulsed gas discharges. // UVN. Reviews of Actual Problems 2006. Vol.176, No.10, pp.1069-1091.

94. Luo B., Wang J., Dai D., Jia L., Li., Wang T. Partial Discharge Simulation of Air Gap Defects in Oil-Paper Insulation Paperboard of Converter Transformer under Different Ratios of AC-DC Combined Voltage // Energies, 2021, 14, 6995.

95. Kincht N.V., Borisov B.D., Petrunko N.N. Assessment questions of the multiple partial discharges in the high-voltage equipment. // Electricity. Transmission and Distribution, 2019 № 2(53).

96. Vdoviko, V.P., Partial discharges in diagnostics of the high-voltage equipment (in Russian) // Novosibirsk: Nauka. - 2007. - 155c.

97. Rusov, V.A., Measurement of the partial discharges in the insulation of the high-voltage equipment. // Yekaterinburg: UrGUPS, 2011. - 370 c. - ISBN: 978-5-94614-177-2.

98. Taylor N. A literature review: The nature of partial discharges in stator insulation. // ETK, KTH. 2008. P.34.

99. Kaziz S., Said M.H., Imburgia A., Maamer M, Flandre D., Romano P., Tounsi F. Radiometric Partial Discharge Detection: A Review // Energies 2023, 16, 1978.

100. Zhang X., Pang B., Liu Y., Liu S., Xu P., Li Y., Liu Y., Qi L., Hie Q. Review on detection and analysis of partial discharge along power cables // Energies, 2021, 14 (22), 7692.

101. Raziq H., Batoola M., Nawaz F., Akgul A., Afzal F., Hassani M.K. A review on analysis and modeling of electrical machine insulation system // Electrical & Electronic Engineering, 2024, V.11, 2400614.

102. Ba Boraik A.M., Usachev A.E., Kubarev A.Yu., Ildarkhanov R.G. New methodology for determination of the sizes and positions of the defects in the insulation of the stator windings of the turbogenerators at the measurements of the partial discharges in them. // Izvestiya Vuzov. Problems of power engineering. 2018. T.20. № 1-2. C. 41-53.

103. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю., Исследование характеристик частичных разрядов в одиночном воздушном дефекте изоляции. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026;28(4):96-107. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2026-28-4-96-107.

104. Kubarev A.Yu., Usachev A.E., Mikhailova E.V., Modeling of partial discharge waveforms in a generalized model of power transformer insulation // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446437; ISBN Information: Electronic ISBN:978-1-7281-4587-7; USB ISBN:978-1-5386-1797-7; Print on Demand (PoD) ISBN:978-1-7281-4588-4 .

105. Kubarev A.Yu., Usachev A.E., Paramonov M.A., Analysis of power transformer monitoring systems // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553850 Electronic ISBN:979-8 3503-9501-3 USB ISBN:979-8-3503-9500-6 Print on Demand (PoD) ISBN:979-8-3503-9502-0.

106. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L., Modeling of partial discharges from a spherical cavity inside a dielectric material in electric fields of variable frequency // Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008. Annual reporting conference. - IEEE, 2008. - C. 447 450.

107. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е., Бобоев Ш.А., Моделирование частичных разрядов внутри дефектов изоляции помощью comsol multiphysics // Материалы докладов Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2025 «Энергетика и цифровая трансформация», г. Казань, КГЭУ, 2025 г., Том 1 с.879-882.

108. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Исследование распределения электрического поля и частичных разрядов в твердой изоляции силовых трансформаторов помощью COMSOL Multiphysics// Материалы докладов XII Международной научной четаевской конференции «аналитическая механика, устойчивость и управление», г. Казань, КНИТУ-КАИ, 2025 г., Том II с.270-274.

109. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю., Измерительная ячейка для изучения характеристик частичных разрядов в газовых дефектах изоляции. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025; 27(3): 14-22. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-14-22.

110. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е., Бобоев Ш.А., Анализ частичных разрядов в повреждениях твердой изоляции силовых трансформаторов // Материалы докладов XXIX Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященный «Дню Энергетика», г. Казань, КГЭУ, 2025 г., Том 1 с.48-51.

111. Андреев А.М., Дудкин С.М., Монастырский А.Е., Таджибаев А.И., Титков В.В. Изоляция установок высокого напряжения. измерения частичных разрядов и оценка технического состояния, ISBN: 978-5-7422-7380-6, 2021.

112. Коробейников С.М., Овсянников А.Г. Физические механизмы частичных разрядов: монография – 2-е изд., испр. // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. - 266 с.

113. Illias H.A. Measurement and Simulation of Partial Discharges within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material, Abstract // Sauthampton: University of Sauthampton, 2011. – 213 с. http://eprints.soton.ac.uk.

114. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования // Екатеринбург: УрГУПС, 2011. - 370 с.

115. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю. Ионизация воздуха в околокритическом электрическом поле // Журнал технической физики, 2006. Т.76, в.3, с.38-43.

116. Ju Li at all. A Review of Recent Advances of Dielectric Barrier Discharge Plasma in Catalysis // Nanomaterials 2019, 9(10), 1428; https://doi.org/10.3390/nano9101428.

117. Baboraik A.M.,·Usachev A.E., Ziad M.Ali A. New Proposed Method for Interpretation On line Partial Discharge Measurements Data of Turbine Generator. // Journal of Electrical Engineering & Technology 2020, 15, pp.1301–1311.

118. Frederic N., Evgenievich U.A. & Yuryevich K.A., Development of methods for measuring partial discharges in the solid insulation with gaseous defects of power transformers. Journal of Electrical Systems and Inf Technol 13, 28 (2026). https://doi.org/10.1186/s43067-026-00333-1.

119. Wang H., et al. Partial discharge measurement and analysis under lightning impulse superimposed DC voltage in SF6 gas. High Volt. 7(4), 744–752 (2022).

120. Korobeynikov S. M., Ridel A. V., Ovsyannikov A. G., Karpov D. I., Lyutikova M. N., Loman V. A., Savenko R. A., Streamers in transformer oil initiated by partial discharge in a bubble at low AC electric fields / – DOI 10.1007/s00202-024-02359 // Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 106, iss. 4. – P. 5219–5228.

121. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. – Изд. 7-е, исп. // М.: Наука, 1988. - 512 с.

122. C Yang at all., Research on transient simulation of partial discharge based on differential-algebraic equation approach. // J. Phys.: Conf. Ser. 3110 (2025) 012008/ pp.1-6.- doi:10.1088/1742-6596/3110/1/012008.

123. Петренко Ю.В. Теоретические основы электротехники. Переходные процессы в линейных электрических цепях. // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. - 84 с.

124. Pattanadech N. et al. Partial Discharges (PD): Detection, Identification and Localization. – John Wiley & Sons, 2023.

125. G Wu, T Zhang, B Cao, K Liu, K Chen. A review and progress of insulation fault diagnosis for cable using partial discharge approach.// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2025. (том: 32 , выпуск: 3, июнь 2025 г.) pp.1639-1652. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3524332.

126. LT Thobejane, BA Thango., Partial discharge source classification in power transformers: A systematic literature review. // Appl. Sci. 2024 , 14 (14), 6097; https://doi.org/10.3390/app14146097.

127. Staubach C., Reddig S. and Zander P., Practical Experience with PD-Localization in Rotating Machines, 2024 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika), Pilsen, Czech Republic, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/Diagnostika61830.2024.10693883.

128. Ба Бораик А. М., Усачев А. Е., Ильдарханов Р. Г., Кубарев А.Ю. Новая методика определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров турбогенераторов при измерениях в них частичных разрядов // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 41-53. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-41-53

129. ГОСТ 1516.2-97 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кв и выше

130. Кучинский Г.С. и др., Силовые электрические конденсаторы. – М.: Энергия, 1975. – 368 с.

131. Эпштейн С.Л., Измерение характеристик конденсаторов. – Л.:Энергия, 1971. – 287 с.

132. Макаров Е.Г., Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс.– Спб.: Питер. 2003. – 448 с.: ил.

133. ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. М.: Стандартинформ, 2008.

134. Овсянников А.Г., Частичные разряды и диагностирование оборудования высокого напряжения. Новосибирск: НГТУ, 2023. 256 с.

135. Wu K., Suzuoki Ya., Mizutani T., et al. Model for partial discharges associated with treeing breakdown: I. PDs in tree channels. II. Tree growth affected by PDs. III. PD extinction and re-growth of tree. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, vol. 33, no. 10, pp. 1197–1218.

136. Живодерников С.В., Ботов С.В., Мыльников И.Б., Овсянников А.Г., Скиба Д.А Онлайн-измерения и мониторинг частичных разрядов в кабелях высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена, «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение» № 3(90), май-июнь 2025.

137. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е., МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ДЕФЕКТАХ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования: материалы международной научно-практической конференции, Казань, 2026 г., Ц75 с.827-831. ISBN 978-5-89873-721-4.

138. Ньетерейе Фредерик, Усачёв А.Е., Параметры частичных разрядов в газовых дефектах высоковольтной изоляции // Материалы докладов Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2026 «Энергетика и цифровая трансформация», г. Казань, КГЭУ, 2026 г., Том 1 с.879-882.

139. Ньетерейе Фредерик, Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю., Исследование характеристик частичных разрядов в одиночном воздушном дефекте изоляции. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026;28(4):96-107. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2026-28-4-96-107.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я, автор, Ньетерейе Фредерик выражаю глубокую признательность Правительствам Республики Бурунди и Российской Федерации за предоставленную возможность учиться в Российской Федерации с 2019 по 2020 год на подготовительном курсе (русский язык), с 2020 по 2022 года в магистратуре и с 2022 года по 2026 года в аспирантуре.

Выражаю глубокую благодарность своему научному руководителю – доктору физико-математических наук, профессору Усачеву Александру Евгеньевичу за постоянную помощь и советы при проведении исследований и учебы в магистратуре и в аспирантуре, ассистенту Бобоеву Шухрату Абдусаломовичу за помощь в ходе выполнения эксиперименталных исследований, а также кандидату технических наук Кубареву Артёму Юрьевичу и кандидату технических наук Зарипову Дамиру Камилевичу за ценные советы и консультации в ходе выполнения исследования.

Выражаю благодарность заведующему кафедрой «Электрические станции имени В.К. Шибанова» Абдуллазянову Рустему Эдвардовичу и всему преподавательскому состову кафедры за помощь и поддержку во время обучения в Казанском государственном энергетическом университете (КГЭУ). Также хочу искренне поблагодарить мою семью за терпение и поддержку.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1: Исходный код программы «Программа расчета параметров частичных разрядов в газовых дефектах изоляции высоковольтного электрооборудования » на языке Pascal в среде Delphi 7.

```
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, math, Menus, jpeg, ComCtrls, TeEngine,
  Series, TeeProcs, Chart;
type
  TForm1 = class(TForm)
    MainMenu1: TMainMenu;
    N1: TMenuItem;
    Panel1: TPanel;
    LabeledEdit1: TLabeledEdit;
    LabeledEdit2: TLabeledEdit;
    LabeledEdit3: TLabeledEdit;
    LabeledEdit4: TLabeledEdit;
    Button1: TButton;
    PageControl1: TPageControl;
    TabSheet2: TTabSheet;
    LabeledEdit5: TLabeledEdit;
    LabeledEdit6: TLabeledEdit;
    LabeledEdit7: TLabeledEdit;
    TabSheet1: TTabSheet;
    Memo1: TMemo;
    Image1: TImage;
    N6: TMenuItem;
    Image4: TImage;
    TabSheet3: TTabSheet;
    Image2: TImage;
    Image3: TImage;
    Image5: TImage;
    LabeledEdit8: TLabeledEdit;
    Image6: TImage;
```

```
    LabeledEdit9: TLabeledEdit;
    N2: TMenuItem;
    Panel2: TPanel;
    Image7: TImage;
    LabeledEdit10: TLabeledEdit;
    LabeledEdit11: TLabeledEdit;
    LabeledEdit12: TLabeledEdit;
    LabeledEdit13: TLabeledEdit;
    Chart1: TChart;
    Series1: TFastLineSeries;
    Image8: TImage;
    LabeledEdit14: TLabeledEdit;
    N3: TMenuItem;
    Series2: TFastLineSeries;
    Series3: TFastLineSeries;
    Series4: TFastLineSeries;
    Series5: TFastLineSeries;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure N6Click(Sender: TObject);
    procedure N2Click(Sender: TObject);
    procedure N3Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
 const e0=8.854e-12;dzcell=2.5e-3; rxcell=18e-3;rzcell=25e-3;Sob=4225e-6;
       w50=100*pi;
var
  Form1: TForm1;
  Ccell, Ccav, c1,c2,c3,Cst0,Cst1,dC,U0,tpd,Upd,qpd,
  dUst, dUcell,em,e1,e2,h1,hcav,dcav:double;
implementation
{$R *.dfm}
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
 var i,N:word;   R,x,z,d,em,Ccell,Ci,c11,ri,zi,x0,x1,xi,dx,sum,sum1,s,s0,s1,h,a:real;
```

```
begin
 R:=25e-3;  //Radius electroda
 d:=dzcell;
 em:=StrToFloat(LabeledEdit1.Text);
 N:=StrToInt(LabeledEdit3.Text);
 memo1.Lines.Add('N ='+LabeledEdit3.Text);
 sum:=0;sum1:=0;x0:=0;s0:=0; dx:=18e-3/N;
 for i:=1 to N do
  begin
   x1:=dx*i; // Outer radius of a flat ring
   //memo1.Lines.Add('x1 ='+floattostr(x1*1e3)+' мм');
   a:=arcsin(x1/r);  // The angle between the axis and the generatrix of a cone with a base of radius x1
   s1:=2*a*sqr(R);  // The area of a sphere of radius R with a central solid angle of 2*a steradians
   //x:=(x0+x1)/2; // average radius of the ring
  // memo1.Lines.Add('x ='+floattostr(x*1e3)+' мм');
   //z:=R-sqrt(sqr(R)-sqr(x));
   //memo1.Lines.Add('z ='+floattostr(z*1e3)+' мм');
   z:=R-sqrt(sqr(R)-sqr(dx*(i-0.5)));
   //memo1.Lines.Add('z ='+floattostr(z*1e3)+' мм');
   s:= s1-s0; // Surface area for a ring with radii x0 (inner) and x1 (outer)
   s0:=s1;
   ci:=e0*s/(2*z+2.5e-3); // Capacity of an air condenser with annular surfaces
   sum:=sum+ci;  // Summation of the capacitances of individual capacitors
   sum1:=sum1+s; // Summing the area of all rings
   //x0:=x1;    // Assigning the inner radius of the next ring (equal to the outer radius of the previous one)
   s0:=sum1;
  end; {for}
 //s0:=sum1; // Electrode area without lateral surface
 Ccell:=sum;  // Cell capacity without oil and without side surface
 memo1.Lines.Add('Ёмкость ячейки без масла ='+floattostrF(ccell*1e12,fffixed,5,3)+' пФ');
 memo1.Lines.Add('Ёмкость ячейки с маслом ='+floattostrF(ccell*2.5*1e12,fffixed,5,3)+' пФ');
 s0:=2*pi*sqr(18e-3)*5.35e-3; // площадь боковой поверхности электрода
 s1:=e0*s/(2*(7.65+13)*1e-3/2.5e-3);  // ёмкость боковой поверхности электрода
 Ccell:=Ccell+s1;
 memo1.Lines.Add('Ёмкость ячейки+бок ='+floattostrF(ccell*2.6*1e12,fffixed,5,3)+' пФ');
 S:=2*arcsin(18/25)*sqr(R);
```

```
 memo1.Lines.Add('Площадь электрода ='+floattostrF(S*1e6,fffixed,8,1)+' кв.мм');
 memo1.Lines.Add('Площадь электрода 1 ='+floattostrF(sum1*1e6,fffixed,8,1)+' кв.мм');
end;
procedure TForm1.N6Click(Sender: TObject);
var i,N:word;
 R,d,d1,a,Ci,c11,ri,z,x0,x1,x,dx,sum,sum1,sum2,s,s0,s1,h2,Scav,Cst0,Cst1:double;
begin
 R:=rzcell;  //Radius electroda
 d:=dzcell;
 em:=StrToFloat(LabeledEdit1.Text);
 U0:=StrToFloat(LabeledEdit2.Text)*1e3;
 tpd:=StrToFloat(LabeledEdit9.Text)*1e-3;
 Upd:=U0*sin(100*pi*tpd);
 N:=StrToInt(LabeledEdit3.Text);
 dx:=rxcell/N;
 h1:=StrToFloat(LabeledEdit4.Text)/1000;
 e1:=StrToFloat(LabeledEdit5.Text);
 hcav:=StrToFloat(LabeledEdit6.Text)/1000;
 h2:=hcav;
 e2:=StrToFloat(LabeledEdit7.Text);
 dcav:=StrToFloat(LabeledEdit8.Text)/1000;
 Scav:=pi*sqr(dcav)/4;
 memo1.Lines.Add('N ='+LabeledEdit3.Text);
 sum:=0;sum1:=0;x0:=0;s0:=0;sum2:=0;
 for i:=1 to N do
  begin
   x1:=dx*i; // Outer radius of a flat ring
   a:=arcsin(x1/r);  // The angle between the axis and the generatrix of a cone with a base of radius x1
   s1:=2*a*sqr(R);  // The area of ??a sphere of radius R with a central solid angle of 2*a steradians
   x:=(x0+x1)/2; // average radius of the ring
   z:=R-sqrt(sqr(R)-sqr(x));
  // memo1.Lines.Add('z ='+floattostr(z));
   s:= s1-s0; // Surface area for a ring with radii x0 (inner) and x1 (outer)
   ci:=s/(z+d/2-h1-h2/2); // Capacity of an air condenser with annular surfaces
   c11:=s/(z+d/2);
   sum:=sum+ci;  // Summation of the capacitances of individual capacitors
```

```
 sum2:=sum2+c11;
 sum1:=sum1+s; // Summing the area of all rings
 x0:=x1;    // Assigning the inner radius of the next ring (equal to the outer radius of the previous one)
 //s0:=sum1;
 s0:=s1;
end; {for}
c1:=e0*em*sum;
c2:=e0*e1*sob/h1;
c3:=e0*e2*sob/h2;
c11:=e0*em*sum2;
Ccell:=1/(2/c1+2/c2+1/c3);
LabeledEdit11.Text:=floattostrF(ccell*1e12,fffixed,5,3);
S:=sum1;
memo1.Lines.Add('Сумма площадей колец ='+floattostrF(S*1e6,fffixed,8,1)+' кв.мм');
S:=2*arcsin(18/25)*sqr(R);
memo1.Lines.Add('Площадь электрода ='+floattostrF(S*1e6,fffixed,8,1)+' кв.мм');
//memo1.Lines.Add('C11 = '+floattostrF(C11*1e12,fffixed,5,3)+' пФ');
memo1.Lines.Add('Ёмкость ячейки с образцом = '+floattostrF(ccell*1e12,fffixed,5,3)+' пФ');
memo1.Lines.Add('Ёмкость ячейки без образца = '+floattostrF(c11/2*1e12,fffixed,5,3)+' пФ');
c1:=e0*em*Scav/(d/2-h1-h2/2);
c2:=e0*e1*scav/h1;
c3:=e0*scav/h2;
memo1.Lines.Add('C1 = '+floattostrF(C1*1e15,fffixed,5,3)+' Фф');
memo1.Lines.Add('C2 = '+floattostrF(C2*1e15,fffixed,8,3)+' ФФ');
memo1.Lines.Add('C3 = '+floattostrF(C3*1e15,fffixed,5,3)+' ФФ');
Cst0:=1/(2/c1+2/c2+1/c3);
Cst1:=1/(2/c1+2/c2);
memo1.Lines.Add('C столбика с дефектом до ЧР = '+floattostrF(Cst0*1e15,fffixed,5,3)+' фФ');
memo1.Lines.Add('C столбика с дефектом после ЧР = '+floattostrF(Cst1*1e15,fffixed,5,3)+' фФ');
dC:=Cst0-Cst1;
memo1.Lines.Add('dC-изменение ёмкости при ЧР = '+floattostrF(dC*1e15,fffixed,5,3)+' фФ');
memo1.Lines.Add('U0 - амплитудное згачение ВН = '+floattostrF(U0*1e-3,fffixed,5,2)+' кВ');
memo1.Lines.Add('tpd - время от начала синусоиды напряжения до Upd =
'+floattostrF(tpd*1e3,fffixed,5,2)+' мс');
memo1.Lines.Add('Upd - напряжение возникновения ЧР = '+floattostrF(Upd*1e-3,fffixed,5,2)+' кВ');
dUcell:=Upd*dC/Ccell;
```

```
 memo1.Lines.Add('dU - ожидаемый бросок U при ЧР = '+floattostr(U0)+' В');
 //memo1.Lines.Add('dU - ожидаемый бросок U При ЧР = '+floattostrF(U0*1e-3,fffixed,5,2)+' кВ');
 qpd:=Upd*dC;
 memo1.Lines.Add('qpd - кажущийся заряд = '+floattostrF(qpd*1e12,fffixed,8,2)+' пКл');
 dUst:=Upd*dC/Cst1;
 memo1.Lines.Add('dUst-бросок U на столбике при ЧР = '+floattostrF(dUst,fffixed,6,0)+' В');
 dUcell:=dUst*Cst1/Ccell;
 memo1.Lines.Add('dUcell-бросок U на ячейке при ЧР = '+floattostrF(dUcell,fffixed,4,1)+' В');
 dUcell:=Upd*dC/Ccell;
 memo1.Lines.Add('dUcell-бросок U на ячейке при ЧР = '+floattostrF(dUcell,fffixed,4,1)+' В');
 LabeledEdit13.Text:=floattostrF(dUcell,fffixed,6,3);
 x:=1/(100*pi*Ccell);
 memo1.Lines.Add('Xcell-сопротивление ячейки при 50 Гц = '+floattostrF(x*1e-6,fffixed,6,1)+' МОм');
end;
procedure TForm1.N2Click(Sender: TObject);
var i,N,j:word; R,L,C1,dU,dUR,dUvn,UR,Ut,Ippt,Z,Z0,Zw,xc,xl,x,w0,w,dw,
    k,beta,gamma,teta,t,t0,tbegin,tend,dt,tau,i0,it,p1,p2,p12:real;
    kol:boolean; Lmas:array[0..4] of real; str:string;
begin
 for i:=0 to 4 do Chart1.Series[i].Clear;
 Lmas[0]:=1e-6; Lmas[1]:=2e-6; Lmas[2]:=5e-6;Lmas[3]:=10e-6;Lmas[4]:=20e-6;
 C1:=StrToFloat(LabeledEdit11.Text)*1e-12;
 chart1.Series[0].Title:='L=1 мкГн';
 chart1.Series[1].Title:='L=2 мкГн';
 chart1.Series[2].Title:='L=5 мкГн';
 chart1.Series[3].Title:='L=10 мкГн';
 chart1.Series[4].Title:='L=20 мкГн';
 //L:=StrToFloat(LabeledEdit10.Text)*1e-6;
 R:=StrToFloat(LabeledEdit12.Text)*1e3;
 dU:=StrToFloat(LabeledEdit13.Text);
 tend:=StrToFloat(LabeledEdit14.Text)*1e-9;
 dt:=tend/999;
 for j:=0 to 4 do
  begin
   L:=Lmas[j];
   Z0:=sqrt(L/C1); //Волновое сопротивление при R=0
```

```
 w0:=Sqrt(1/L/C1); // частота собственных колебаний при R=0
 t0:=2*pi/w0;// Период собственных колебаний
 beta:=R/(2*L);   // коэффициент затухания  U=U0*exp(-beta*t)
 tau:=1/beta; // Постоянная времени ПП
 gamma:=R/(2*Z0);
 dw:=sqr(w0)-sqr(beta);
 if dw>0 then begin
            kol:=true; str:='существует';
            w:=sqrt(dw);
            x:=w*L-1/(w*C1);
            Zw:=Sqrt(Sqr(R)+sqr(x)); //Волновое сопротивление при R не равно
            memo1.Lines.Add('w = '+FloatToStrF(w*1e-6,fffixed,8,2)+' 1/c');
            teta:=arctan(w/beta);
            memo1.Lines.Add('teta = '+FloatToStrF(teta*180/pi,fffixed,8,2)+' градус');
          end
        else begin
             kol:=false; str:='нет';
             p1:=-beta+sqrt(-dw);
             p2:=-beta-sqrt(-dw);
             p12:=p1-p2;
            end;   {if}
//memo1.Lines.Add('C = '+FloatToStr(C1*1e12)+' пФ');
memo1.Lines.Add('L = '+FloatToStr(L*1e6)+' мкГн');
memo1.Lines.Add('R = '+FloatToStr(R*1e-3)+' кОм');
memo1.Lines.Add('dU = '+FloatToStr(dU)+' В');
memo1.Lines.Add('Z0 = '+FloatToStr(Z0)+' Ом');
memo1.Lines.Add('C = '+FloatToStr(C1*1e12)+' пФ');
memo1.Lines.Add('beta = '+FloatToStr(beta));
memo1.Lines.Add('tau = '+FloatToStr(tau*1e9)+' нс');
memo1.Lines.Add('T0 = '+FloatToStrF(t0*1e9,fffixed,8,2)+' нс');
memo1.Lines.Add('gamma = '+FloatToStrF(gamma,fffixed,4,2));
memo1.Lines.Add('w0 = '+FloatToStrF(w0*1e-6,fffixed,8,2)+' 1/c');
memo1.Lines.Add('f = '+FloatToStrF(w/2/pi*1e-6,fffixed,8,2)+' МГц');
 k:=exp(beta*T0/2);//Отношение амплитуд двух последовательных полупериодов ПП
//memo1.Lines.Add('A2/A3 = '+FloatToStrF(k,fffixed,4,2));
//dt:= beta*T0/2;
```

```
 //memo1.Lines.Add('beta*t0/2 = '+FloatToStr(t0));
 //dUR:=du/zw*R;
 //  memo1.Lines.Add('dUcell = '+FloatToStr(du)+' V');
 //  memo1.Lines.Add('dUR = '+FloatToStr(dur)+' V');
 //    dUvn:=100-sin(w50*tpd)/sin(w50*(tpd+5*t0))*100;// изменение сетевого напряжения при 5
периодах ЧР
 //  memo1.Lines.Add('изменение Uвн за время СР = '+FloatToStrF(duvn,fffixed,4,2)+' %');
 memo1.Lines.Add('Колебательный процесс = '+str);
   for i:=0 to 1000 do
    begin
     t:=dt*i;
     if kol then Ut:=Upd+dU*w0/w*sin(w*t+teta)*exp(-beta*t)
           else Ut:=Upd+dU/p12*(p1*exp(p2*t)-p2*exp(p1*t));
     Chart1.Series[j].AddXY(t*1e9,Ut);
    end; {foi i}
 end; {for j}
  chart1.SaveToMetafileEnh('Transient process at PD. L= '+LabeledEdit10.Text+' мкГн'+'.emf');
  //chart1.SaveToBitmapFile('.bmp');
 // chart1.SaveToBitmapFile('Transient process at PD. L= '+LabeledEdit10.Text+' мкГн'+'.bmp');
end;
procedure TForm1.N3Click(Sender: TObject);
var i,N,j:word; R,L,C1,dU,dUR,dUvn,UR,Ut,Ippt,Z,Z0,Zw,xc,xl,x,w0,w,dw,
     k,beta,beta1,gamma,teta,t,t0,tbegin,tend,dt,tau,i0,it,p1,p2,p12:real;
     kol:boolean; Lmas:array[0..4] of real; str:string;
begin
 for i:=0 to 4 do Chart1.Series[i].Clear;
 Lmas[0]:=1e-6; Lmas[1]:=2e-6; Lmas[2]:=5e-6;Lmas[3]:=10e-6;Lmas[4]:=20e-6;
 C1:=StrToFloat(LabeledEdit11.Text)*1e-12;
 chart1.Series[0].Title:='L=1 мкГн';
 chart1.Series[1].Title:='L=2 мкГн';
 chart1.Series[2].Title:='L=5 мкГн';
 chart1.Series[3].Title:='L=10 мкГн';
 chart1.Series[4].Title:='L=20 мкГн';
 //L:=StrToFloat(LabeledEdit10.Text)*1e-6;
 R:=StrToFloat(LabeledEdit12.Text)*1e3;
 dU:=StrToFloat(LabeledEdit13.Text);
```

```
tend:=StrToFloat(LabeledEdit14.Text)*1e-9;
dt:=tend/999;
for j:=0 to 4 do
 begin
  L:=Lmas[j];
  Z0:=sqrt(L/C1); //Волновое сопротивление при R=0
  w0:=Sqrt(1/L/C1); // частота собственных колебаний при R=0
  t0:=2*pi/w0;// Период собственных колебаний
  beta:=R/(2*L);   // коэффициент затухания  U=U0*exp(-beta*t)
  tau:=1/beta; // Постоянная времени ПП
  beta1:=1/R/C1;
  gamma:=R/(2*Z0);
  dw:=sqr(w0)-sqr(beta);
  if dw>0 then begin
               kol:=true; str:='существует';
               w:=sqrt(dw);
               x:=w*L-1/(w*C1);
               Zw:=Sqrt(Sqr(R)+sqr(x)); //Волновое сопротивление при R не равно
               teta:=arctan(w/beta);
              end
          else begin
                kol:=false; str:='нет';
                p1:=-beta+sqrt(-dw);
                p2:=-beta-sqrt(-dw);
                p12:=p1-p2;
               end;   {if}
(* memo1.Lines.Add('C = '+FloatToStr(C1*1e12)+' пФ');
 memo1.Lines.Add('L = '+FloatToStr(L*1e6)+' мкГн');
 memo1.Lines.Add('R = '+FloatToStr(R*1e-3)+' кОм');
 memo1.Lines.Add('dU = '+FloatToStr(dU)+' В');
 memo1.Lines.Add('Z0 = '+FloatToStr(Z0)+' Ом');
 memo1.Lines.Add('C = '+FloatToStr(C1*1e12)+' пФ');
 memo1.Lines.Add('beta = '+FloatToStr(beta));
 memo1.Lines.Add('tau = '+FloatToStr(tau*1e9)+' нс');
 memo1.Lines.Add('T0 = '+FloatToStrF(t0*1e9,fffixed,8,2)+' нс');
 memo1.Lines.Add('gamma = '+FloatToStrF(gamma,fffixed,4,2));
```

```
 memo1.Lines.Add('f0 = '+FloatToStrF(w0/2/pi*1e-6,fffixed,8,2)+' МГц');
 memo1.Lines.Add('f = '+FloatToStrF(w/2/pi*1e-6,fffixed,8,2)+' МГц');   *)
  k:=exp(beta*T0/2);//Отношение амплитуд двух последовательных полупериодов ПП
 //memo1.Lines.Add('A2/A3 = '+FloatToStrF(k,fffixed,4,2));
 //dt:= beta*T0/2;
 //memo1.Lines.Add('beta*t0/2 = '+FloatToStr(t0));
 //dUR:=du/zw*R;
 //  memo1.Lines.Add('dUcell = '+FloatToStr(du)+' V');
 //  memo1.Lines.Add('dUR = '+FloatToStr(dur)+' V');
 //    dUvn:=100-sin(w50*tpd)/sin(w50*(tpd+5*t0))*100;// изменение сетевого напряжения при 5
периодах ЧР
 //  memo1.Lines.Add('изменение Uвн за время СР = '+FloatToStrF(duvn,fffixed,4,2)+' %');
 memo1.Lines.Add('Колебательный процесс = '+str);
  for i:=0 to 1000 do
   begin
    t:=dt*i;
    if kol then Ut:=-dU*w0/w*sin(w*t+teta)*exp(-beta*t)/Zw*R
          else Ut:=-dU/p12*(p1*exp(p2*t)-p2*exp(p1*t));
    Chart1.Series[j].AddXY(t*1e9,Ut);
   end; {foi i}
 end; {for j}
 chart1.SaveToMetafileEnh('Transient process at PD. L= '+LabeledEdit10.Text+' мкГн'+'.emf');
 //chart1.SaveToBitmapFile('.bmp');
// chart1.SaveToBitmapFile('Transient process at PD. L= '+LabeledEdit10.Text+' мкГн'+'.bmp');
end;
end.
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2: Статистические данные измерений ЧР в лаборатории техники высоких напряжений кафедры «Электрические станции имени В.К. Шибанова» в ФГБОУ ВО «КГЭУ» в установке с измерительной ячейкой «плоский конденсатор» «диск-диск» (ИЯДД)

h = 0,3 мм					
8 кВ		9 кВ		10 кВ	
фазовый уголЧР ($\varphi_{чр}$), град	Амплитуд, мВ	фазовый угол ЧР ($\varphi_{чр}$), град	Амплитуд, мВ	фазовый угол ЧР ($\varphi_{чр}$),град	Амплитуд, мВ
45	9	216	-5	212,4	-26
72	11	243	-40	227,7	-30
81	15	279	-5	246,6	-36
198	-8	36	3	271,8	-6
216	-23	45	34	306	-55
234	-3	49,5	4	46,8	4
18	31	63	40	52,2	32
45	13	72	6	64,8	11
72	37	99	25	70,2	38
81	42	111,6	4	86,4	44
225	-11				
261	-10				
45	35				
54	23				
63	13				
86,4	44				

h = 0,5 мм			
8 кВ		10 кВ	
фазовый угол ЧР ($\varphi_{чр}$), глад	Амплитуд, мВ	фазовый угол ЧР ($\varphi_{чр}$), глад	Амплитуд, мВ
27	20	45	10
36	42	198	-35
63	38	234	-140
72	25	252	-12
81	4	18	40
252	-5	225	-200
270	-19	45	152
351	-3	63	70
9	41	72	20
27	42		
45	10		
82,8	11		
91,8	7		
252	-31		
45	44		
54	4		
72	54		
h = 0,6 мм			
288	-10	72	10
36	15	144	20
9	298	45	25
36	8	72	25

72	20	234	-10
36	15	279	-15
72	12	72	40
216	-40		
252	115		
36	12		
37,8	10		
216	-20		
252	-32		
36	118		
216	-38		
252	-160		
h = 1,1 мм			
8 кВ		9 кВ	
216	-240	36	98
45	30	216	-200
225	-310	234	125
216	-22	252	20
234	-22	351	99
252	-80	27	80
270	-75	36	58

h = 0,8 мм											
5,5 кВ		6 кВ		7 кВ		8 кВ		9 кВ		10 кВ	
$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ	$\varphi_{чр}$	Апл., мВ	$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ	$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ	$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ	$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ
234	-20	63	44	72	65	216	-140	360	-280	18	40
234	-22	252	-66	36	30	252	-80	90	160	36	100
252	-64	252	-28	54	38	234	-20	207	-160	216	-180
234	-24	36	6	72	11	63	85	54	200	90	80
234	-102	54	82	216	-92	270	-50	90	120	216	-300
216	-84	63	8	63	15	36	240	198	-220	180	160
252	-22	243	-22	36	19	36	55	108	130	270	-400
54	60	234	-100	54	21	72	50	198	-80	27	80
234	-42	252	-4	243	-25	234	-16	216	-680	216	-80
270	-38	72	20	36	62	45	56	270	-170	216	-100
		216	-64	63	14	216	-32	72	360	18	90
		252	-26	45	40	54	20	90	100	36	260
		54	28	54	84	72	26	216	-330	72	280
		234	-64	36	88	234	-90	216	-220	198	-80
		234	-18	234	-39	252	-30	36	80	36	60
		252	-24	261	-12	72	100	198	-40	198	-60
				54	50	216	-110	18	40	54	1080
				36	58	261	-30	63	260	216	-270
				27	25	36	20	162	80	252	-670
				207	-19	18	175	216	-300	54	40
				36	112	36	140	216	-80	18	760
				63	10	36	50	252	-1040	198	-120
				216	-50	72	270	18	160	72	500
				72	14	198	-20	36	100	216	-40
				234	-68	36	30	288	-680	63	550
						54	80	216	-1000	234	-400
						225	-60	36	260	198	-40
						243	-30	243	-680	252	-60

						9	50	36	200	252	-120
						36	65	36	280	72	1040
						288	-50	198	-60	180	660
						45	50	234	-40	342	-150
						54	170	45	270	9	60
								72	800		
								216	-240		

h = 0,9 мм											
5 кВ		6 кВ		7 кВ		8 кВ		9 кВ		10 кВ	
$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ	$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ	$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ	$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ	$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ	$\varphi_{чр}$	Ампл., мВ
252	-500	63	150	36	200	234	-90	261	-590	36	180
72	40	225	-70	270	-100	27	325	225	-275	234	-400
90	125	9	260	36	300	225	-100	234	-110	18	160
270	-110	45	210	207	-100	18	85	225	-230	270	-70
234	-274	45	248	243	-140	54	150	216	-125	270	-60
252	-60	72	235	270	-30	252	-375	243	-190	234	-760
36	35	225	-40	270	-308	90	620	54	275	72	220
225	-140	54	230	27	150	18	100	207	-100	243	-120
27	50	90	320	252	-260	243	-298	252	-405	90	70
63	160	252	-188	63	65	54	485	63	160	54	300
234	-150	216	-300	234	-140	63	110	243	-370	252	-140
36	190	252	-340	234	-75	234	-500	252	-610	216	-60
207	-190	72	150	252	-185	72	140	243	-220	180	130
		261	-140	216	-50	54	115	54	250	216	-200
		252	-250	36	240	261	-590	225	-250	54	80
		261	-200	234	-130	225	-590	234	-480	252	-90
		252	-70	72	70	198	-75	144	380	225	-220
		45	68	36	275	216	-240			270	-80
		81	215	252	-50	252	-400			54	200
		234	-248							72	140
										216	-80
										234	-350
										270	-130
										270	-480
										18	100
										36	140
										252	-160
										225	-100
										252	-100
										54	160
										234	-80
										198	-100
										234	-500
										18	80
										216	-160
										216	-82
										225	-180
										216	-90

ПРИЛОЖЕНИЕ 3: Статистические данные измерений ЧР в лаборатории техники высоких напряжений кафедры «Электрические станции имени В.К. Шибанова» в ФГБОУ ВО «КГЭУ» в установке с измерительной ячейкой для контроля состояния жидких диэлектриков. Данные приведены как для симметричного расположения образцов между электрода-ми ячейки, так и при случайном (несимметрированном) расположении, при котором возможны разные максимальные напря-жённости на границах дефекта. Символами tчр+ и tчр- обозначены времена возникнове-ние ЧР в положительном и отрицательном полупериодах от ближайшего перехода напряжения через ноль, который соответ-ствует максимуму и минимуму напряжения на измерительном со-противлении.

При определении Uчр по (1.1) tчр= tчр+ и tчр= 10 мс+tчр- . В столбцах ЧР+ и ЧР- приведены модули амплитуды ЧР в положительном и отрицательном полупериодах.

h = 0,15 мм															
11 кВ				12,5 Кв				14 кВ				15 кВ			
ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс
110	115	4,5	3	190	240	3	2	200	210	3	1,7	175	140	2,5	1,9
90	68	4,5	3	240	350	3	2	210	230	2,5	2	160	190	2,5	1,9
110	15	4	2,5	180	240	3	2	200	220	2,5	2	180	240	2,5	1,6
150	40	4,8	3	195	200	3,5	2,3	180	200	3	1,7	180	170	2	1,6
115	100	4,8	3	195	170	3,5	2,5	180	190	3	2	175	140	2	1,6
50	22	4,8	3	220	230	3,5	2	180	160	3	2	160	150	2,5	1,9
52	25	4,8	3	200	220	3,5	2,5	180	160	3	1,7	200	200	2	2
120	72	4,8	3	190	210	3	2	180	160	2	1,7	180	160	2	2
10	28	4,5	3	230	230	3	2	180	160	2	2	190	210	2,5	2
52	58	4,8	2,5	200	230	3,5	2	180	160	2	2	180	200	3	1,9
105	42	4,1	2	160	180	3,5	2	180	200	3	1,7	150	170	3	1,9
110	84	4	2	180	160	3	2,5	170	220	2,5	2	200	180	2,5	1,6
30	24	3,8	2	200	200	3	2,5	180	220	2,5	2	170	180	2,5	1,6
120	30	4	3	160	160	3	2	190	220	3	1,7	200	180	2,5	1,6
145	115	4,5	3	180	260	3	2,5	200	210	3	2	120	260	3	1,9
114	18	4	3	180	140	3,5	2	110	130	3	1,7	190	170	3	2
98	18	4	3	200	190	3,5	2	190	200	3	2	190	170	2,5	2
115	18	3,5	2	180	160	3,5	2	190	140	2	2	200	160	2	2
80	45	3	2	185	220	3,5	2,3	190	230	2	2	210	200	2	1,5
108	60	4	2	200	160	3	2	195	210	2	2	200	140	2,5	1,6
145	150	4,5	3	150	220	3	2	180	130	3	1,7	200	210	3	1,9
180	165	4,5	3	170	200	3,5	2	180	230	2,5	2	190	150	3	1,9
180	40	3,8	2,5	198	220	2,5	2,5	200	130	2,5	2	180	170	2,5	1,9
80	40	3,2	2	195	240	3	2	190	135	3	1,7	190	235	2,5	1,6
100	23	4,2	2,5	200	200	3,5	2	180	130	3	2	200	160	2,5	1,6
160	118	4	2	180	230	3,5	2	150	140	3	2	180	180	3	1,6
60	30	3	2	230	240	3	2	190	200	3	1,7	200	185	3	1,9

158	90	4,5	3	170	240	3	2	190	180	2	1,7	195	180	2,5	2
110	118	4,3	2	190	195	3	2,2	70	205	2	2	200	185	2	2
40	65	4	2,5	190	160	3	2,5	210	120	2	2	170	150	2	1,8
140	40	3,5	2,5	200	235	3	2,5	180	165	3	1,7	180	170	2,5	1,8
205	165	4,8	3	190	210	3,5	2	190	140	2,5	2	175	140	2	1,6
145	65	3,8	2,5	200	215	3,5	2	160	140	2,5	2	160	150	2	1,6
120	80	3,8	2	220	220	3,5	2,5	150	140	3	1,7	200	200	2,5	1,6
180	20	4	1,5	195	220	3,5	2,5	210	140	3	2	180	160	2,5	2
100	60	4	2,5	155	170	3	2	180	130	3	1,7	190	150	3	1,6
140	125	4,5	3	175	165	3	2,5	180	200	3	2	180	170	3	1,9
118	100	4	3	190	205	3,5	2,5	200	140	3	2	190	235	3	1,9
40	58	4	2	150	150	3,5	2	190	135	3	2	200	160	2,5	1,6
185	140	4,5	3	170	230	3	2,5	180	130	3	2	180	180	2	1,6
90	120	4	2,5	185	150	3	2	150	140	3	1,7	200	180	2	1,6
100	80	4	2,5	205	200	3	2	190	200	2,5	2	170	180	2,5	1,9
110	100	4,5	2	185	155	3	2	190	180	2,5	2	200	180	2	2
165	165	4,5	3	180	210	3	2,2	70	200	3	2	120	260	2	2
90	35	3,5	2	195	165	3,5	2,5	210	125	3	2	190	170	3	2
140	140	4	3	155	210	3,5	2,5	190	160	3	2	200	140	3	2
240	150	4	2,5	170	190	3,5	2,5	180	140	3	1,7	200	210	3	2
115	100	4,5	3	185	230	3	2,5	170	150	2	2	190	150	2,5	1,9
175	175	4,5	3	190	225	3	2,5	150	140	3	2	180	170	2,5	1,9
100	100	4	2,5	210	205	3,5	2	200	150	3	2	190	235	2,5	1,6

h = 0,2 мм								h = 0,25 мм							
11 кВ				12,5 Кв				9 кВ				12 Кв			
ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс
98	95	3,2	2,5	45	160	3	2,1	47	50	4,5	2,9	92	70	3	3
96	130	3	2,2	100	135	3	2,1	60	60	4,5	2,8	108	100	3	3
95	90	3,1	2,1	100	120	2	2	40	47	4,5	3	80	58	2,5	2,5
95	130	3	2,5	30	150	2	2	60	60	4	2,8	44	62	2,5	2,5
102	130	3	2,5	100	210	2	2	60	80	4	2,8	32	48	3	2
100	150	3,2	2,5	100	130	2	2	42	42	3,7	3	220	65	3	2
80	105	3	2,2	70	160	2	2	67	70	4,5	3	40	50	3	2
85	105	3	2,5	65	110	3	2,1	40	60	4,5	3	55	50	3	2
100	130	3,5	2,5	20	130	3	2,1	60	50	4,5	3	20	85	3,5	2
120	155	3,5	2,8	40	175	2,5	2,1	40	60	4,5	3	70	20	3,5	2,5
120	130	3	2,7	70	42	2,5	2,1	60	60	4,5	3	30	47	3	2,5
110	140	3	2,5	90	150	2,5	2,2	70	70	4,5	3,5	48	42	3	2,5
110	135	3,1	2,2	105	180	2,5	2,2	60	85	3,6	3,5	68	42	3,5	2,5
130	150	3	2,5	90	162	2,5	2,2	70	70	3,7	3,5	192	42	3	3
115	155	3	2,5	90	80	2,5	2,2	82	85	4,5	3,5	65	102	3,5	3
75	115	3	2,5	20	130	2,5	2,1	45	70	4,5	3,5	35	50	3	2,5
100	115	3	2,5	100	165	2,5	2,1	60	45	4,5	3,5	75	50	3	2,5
100	140	3	2,5	100	160	2	2	75	70	4	3	70	97	3	2
110	130	3	2,5	62	130	2	2	50	80	4	2,8	180	35	3	2
110	150	3	2,6	40	180	3	2	58	50	4	2,8	135	105	2	2
100	140	3,2	2,6	70	120	3	2	53	70	4,5	3	60	105	3	2
100	110	3,2	2,5	82	180	2,5	2	63	65	4,5	3	35	40	3,5	2
90	150	3	2,5	20	100	2,5	2,1	35	40	4,5	3	120	62	3	2,5
110	110	3,2	2,6	82	180	3	2,1	43	50	4,5	3	105	160	3	2,5
65	78	3	2	142	160	3	2,1	45	40	4	3,2	100	105	3	2,5
100	132	3,1	2,5	50	15	3	2,1	47	78	3,5	3,2	30	60	3	2,5
115	130	3	2,6	90	125	2,5	2,2	57	62	3,6	3,2	68	28	3	3
100	155	3	2,6	90	110	2,5	2,2	45	42	4	3,2	150	18	3	3
130	135	3,2	2,6	30	140	2,5	2,2	47	65	4,5	3,2	62	110	3	2,5
125	150	3	2,5	110	200	2,5	2,2	30	45	4,5	2,8	72	42	3	2,5

80	130	3	2,5	110	120	2,5	2,1	50	80	4,5	2,9	35	35	3	2
127	140	3,5	2,5	70	160	2,5	2,1	50	60	4	2,8	40	35	3,5	2
168	235	3	2,8	55	90	2	2	55	50	4	3	190	30	3	2
150	240	3	2,6	20	100	2	2	40	70	4,5	2,8	115	190	3	2
180	180	3	2,5	45	125	2	2	80	60	4,5	2,8	30	90	3	2
92	105	3	2,5	70	42	2	2	45	40	4,5	3	120	145	3,5	2,5
100	115	3,1	2,5	80	155	2	2	40	70	4,5	3	200	95	3	2,5
100	135	3	2,5	100	170	2,5	2,5	60	50	4,5	3	100	160	3	2,5
88	90	3,2	2,5	8	155	2,5	2,1	60	82	4,5	3	110	120	3	2,5
100	100	3	2,5	100	70	2,5	2,5	65	80	4	3,5	35	95	3,2	2
95	100	3	2,6	30	120	2,5	2,1	50	50	4	3,5	40	80	3,2	2,5
100	115	3	2,5	90	155	2,5	2,2	70	75	4,5	3,5	45	85	3	2,5
90	140	2,8	2,5	90	150	2,5	2,2	30	85	4,5	3,2	60	55	3,5	3
95	130	3	2,6	70	140	3	2,2	65	35	4,5	3,2	155	45	3	2
120	140	3,2	2,6	50	170	3	2,2	48	55	4,5	3,5	110	120	3,2	3
105	170	3	2,5	60	110	3	2,1	43	70	4,5	3,5	60	85	3	2,5
120	135	3,1	2,2	90	185	3	2	60	45	4,5	3,5	55	40	3	2,4
95	145	3	2,5	25	95	2	2	55	60	4,5	3,5	40	80	3,5	2,5
120	125	3,1	2,5	285	170	2,5	2	50	75	4,5	3,5	175	30	3	2,5
148	150	3	2,6	120	145	2,5	2	45	45	4,5	3,5	145	95	3	3

h = 0,3 мм															
9 кВ				10 Кв				11 кВ				12 кВ			
ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс
230	410	4,5	2,5	290	230	3,5	2,9	200	310	2,7	2,2	330	370	2,4	2,1
210	280	4	3	290	390	3,5	2,5	230	340	2,7	2,1	290	380	2,6	2
240	330	4	3	290	380	3,5	2,5	330	350	3	2,3	300	370	2,5	2
260	370	4,5	3	270	380	3,4	2	340	290	3	2,6	290	380	2,4	2
260	320	4,5	3	380	360	3,4	2,5	200	380	3	2,3	265	370	2,5	2
360	220	4,5	3	190	170	3	2,5	260	230	3	2,3	250	360	2,5	2
160	270	4	3,5	90	210	3	2,5	260	380	3	2,6	240	360	3	2
320	310	3,5	3,5	210	210	3,2	2,5	330	360	3	2,4	270	370	3	2
200	280	4	3	170	170	3,2	2,5	320	370	3	2,4	240	320	3	2
170	280	4,5	3	170	270	4	2,8	250	375	3	2,5	230	330	2,6	2
310	260	4,5	3	250	280	4	2,9	150	270	2,7	2,4	310	360	2,5	2,1
190	360	4	3	240	290	4	2,5	180	240	3	2,4	280	360	2,6	2,1
260	280	4	3	100	190	3,5	2,5	250	400	2,8	2,6	220	310	2,4	2,1
200	280	4,5	3	250	270	3,5	2	180	140	3	2,6	310	310	2,5	2,1
200	290	4,5	2	200	200	3,5	2,5	250	280	2,8	2,4	280	365	2,4	2,2
210	260	4,5	2	200	260	3,4	2,5	160	190	3	2,2	300	360	2,4	2,1
180	260	4	3,5	260	170	3,4	2,5	190	190	2,8	2,1	260	300	2,6	2,3
170	260	4	3,5	70	100	3	2,5	130	170	3	2,3	280	340	2,5	2,3
180	200	4	3	170	190	3	2,5	150	180	3	2,6	270	300	2,4	2
240	140	4,5	3	170	170	3,2	2,8	150	200	3	2,3	260	330	2,5	2
160	260	4,5	3	170	300	3,2	2,9	260	300	3	2,3	260	355	2,5	2
200	280	4	3	270	190	4	2,5	200	300	2,8	2,6	250	300	2,6	2
200	260	4	3	190	290	3,5	2,5	200	300	3	2,4	240	300	2,6	2
220	250	4,5	3	210	230	3,2	2	280	280	2,7	2,4	230	340	2,6	2
160	280	4,5	2	210	220	3,1	2,5	300	270	3	2,5	250	320	2,6	2
240	280	4,5	2	300	330	3,4	2,5	230	180	2,7	2,4	290	320	2,5	2,1
250	340	4	3,5	320	390	3,3	2,5	120	140	3	2,4	200	325	2,6	2,1
250	280	4	3,5	220	270	3,4	2,5	100	140	3	2,6	230	320	3	2,1
240	280	4	3	210	390	3,3	2,5	100	150	3	2,6	230	330	3	2,1
280	380	4,5	3	320	320	3,5	2,8	130	140	2,8	2,4	240	330	3	2,2
190	280	4,5	3	190	230	3,5	2,9	260	270	3	2	270	320	2,5	2,1
170	220	4	3	140	300	3,5	2,5	200	190	3	2,2	245	360	2,6	2,1
190	220	3,5	3	270	230	3,4	2,5	160	300	3	2	245	360	2,6	2
190	215	4,5	3	180	230	3,4	2	130	210	2,5	2,5	270	345	2,6	2

200	290	4,5	3	230	230	3	2,5	180	340	3	2,1	240	360	2,6	2
160	130	4,5	3	170	300	3	2,5	260	230	3	2,3	245	340	2,5	2,1
100	190	4	3,5	270	190	3,2	2,5	350	360	2,8	2,6	270	330	2,6	2,1
170	130	3,5	3,5	190	290	3,2	2,5	310	360	3	2,4	240	360	2,6	2
180	330	4	3	210	230	4	2,5	320	350	2,7	2,4	250	350	2,6	2
200	220	4,5	3	210	220	4	2,8	240	360	3	2,5	210	295	2,6	2
180	200	4,5	2,5	300	330	3,5	2,5	145	270	2,7	2,4	210	300	2,5	2,1
160	230	4	3	320	390	3,5	2,9	180	240	2,8	2,4	230	330	2,6	2,1
180	240	3,5	3	220	270	3,4	2,5	250	380	2,8	2,6	340	340	2,4	2
180	245	4	3	210	390	3,4	2,8	170	140	3	2,6	230	300	2,5	2
170	200	4,5	3	320	320	3	2,5	250	280	2,8	2,4	210	340	2,4	2
170	210	4,5	3	190	230	3	2,5	200	310	3	2,2	245	360	2,5	2
180	210	4	3,5	140	300	3,2	2,5	220	340	3	2,1	270	345	2,6	2
170	140	4	3,5	270	230	3,2	2,8	310	345	2,8	2,3	240	360	3	2
180	240	4	3	180	230	3,5	2,5	330	300	3	2,6	245	340	3	2
185	210	4,5	3	230	230	4	2,9	200	360	3	2,3	270	330	3	2

h = 0,35 мм											
10 кВ				11 Кв				13 кВ			
ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс
72	95	4	3	90	75	3	2	66	55	2,8	1,9
75	82	4	3	40	70	3	2	59	66	2,2	1,9
60	52	4	3	20	72	3	2	37	63	2,5	1,9
85	40	4	3	30	150	2,8	2	59	47	2,2	1,9
85	95	4	3	50	100	3	2,2	57	53	2,8	1,9
85	40	3,5	3	100	150	3	3	41	54	2,5	1,9
52	95	3,5	3	80	70	3,2	2	51	52	2,2	1,9
58	68	3,5	3	30	60	3	2,5	60	58	2,5	1,9
52	65	3	2	80	110	3,2	2	55	100	2,5	1,9
85	85	3,5	3	70	55	3,2	3	58	56	2,5	1,9
50	85	3	3	80	45	3	2	44	68	2,3	1,9
60	28	3	2	90	90	3	2,1	34	86	2,3	1,9
70	70	4	2	75	55	3,2	2	42	94	2,3	1,9
70	90	4	2	40	90	3	2,1	80	94	2,5	1,9
45	48	4	3	45	85	2,9	2	43	58	2,2	1,9
85	48	4	3	70	60	3	2	49	63	2,8	1,9
85	95	4	3	110	130	3	2	70	53	2,2	1,9
85	95	3,5	3	90	125	3	2	49	62	2,5	1,9
85	95	3,5	3	130	110	2,8	2	63	82	2,2	1,9
85	40	3,5	3	60	65	3	2,2	42	67	2,8	1,9
75	85	3	2	80	120	3	2,5	58	78	2,5	1,9
62	58	3,5	2,5	95	150	3,2	2	52	58	2,2	1,9
85	75	3	3	100	140	3	3	42	80	2,5	1,9
85	85	3	3	85	85	3,2	2	74	90	2,5	1,9
50	45	3	3	90	90	3,2	2	42	69	2,5	1,9
85	50	4	3	120	100	3,5	3	53	72	2,3	1,9
85	95	4	3	85	40	3,5	3	26	94	2,3	1,9
50	92	4	2	135	150	3	3	40	56	2,3	1,9
42	45	4	2	125	165	3	3,5	56	84	2,5	1,9
85	90	4	2	40	85	3,5	2,5	40	84	2,2	1,9
60	55	3,5	1,5	95	85	2,8	3	66	60	2,8	1,9
65	68	3,5	2	130	80	3,5	2,5	74	68	2,2	1,9
85	58	3,5	2	80	90	3	2	45	72	2,5	1,9
85	95	3	3	102	65	3,5	2	50	48	2,2	1,9
85	95	3,5	2,5	65	70	3	2	56	82	2,8	1,9
85	95	3	2,5	150	170	3,5	2,5	65	60	2,5	1,9
75	95	3	2	105	175	2,5	2,5	74	68	2,2	1,9

55	50	3	2,5	175	45	3,5	2	45	72	2,5	1,9
85	60	4	2	160	50	3	2	50	48	2,5	1,9
55	95	4	2,5	40	60	3,5	2	54	82	2,5	1,9
62	50	4	2,5	85	75	3	2,5	49	69	2,3	1,9
54	60	4	2,5	45	70	2,5	2,5	65	69	2,3	1,9
45	55	4	3	20	72	2	2,5	62	55	2,3	1,9
85	40	3,5	3	25	150	2,5	2	57	83	2,5	1,9
65	88	3,5	3	45	102	2	3	32	62	2,2	1,9
55	90	3,5	3	110	155	3	2	32	70	2,8	1,9
45	62	3	3	90	70	3,5	2	40	70	2,2	1,9
85	62	3,5	3	50	60	2	2	63	98	2,5	1,9
78	88	3	3	160	220	2,5	2	75	88	2,2	1,9
72	95	4	3	140	120	3	2	60	50	2,8	1,9

h = 0,4 мм							
10 кВ				11 кВ			
ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс
230	240	3,5	3	230	250	3	2,5
230	150	3,5	3	230	250	3	2,5
230	250	4	3	180	250	3	2,5
230	230	4	2,5	230	250	3	2
230	185	3,5	2	230	250	3	2
230	250	3,5	2	230	250	3	2,5
230	220	3,5	2,5	230	250	3	2
230	40	3,5	2,5	230	250	3	2
230	210	3,5	2,5	230	250	3	2,5
230	250	3	3	230	250	3	2
220	210	3	3	230	250	3	2,5
230	190	3,5	3	230	250	3	2,5
230	170	3,5	2,5	230	250	3	2
230	220	4	2	230	250	3	2
230	190	4	2	230	250	3	2,5
230	250	3,5	2,5	230	250	3	2
230	230	3,5	2,5	230	250	3	2
230	250	3,5	2,5	230	250	3	2
230	170	3,5	3	230	250	3	2
230	200	3,5	3	230	250	3	2,5
230	230	3	3	230	250	3	2
230	240	3	2,5	230	250	3	2
230	235	3,5	2	230	250	3	2,5
230	240	3,5	2	230	250	3	3
230	240	4	2,5	230	250	3	2,5
230	240	4	2,5	230	250	3	2,5
230	150	3,5	2,5	230	250	3	2
230	250	3,5	3	180	250	3	2
230	230	3,5	3	230	250	3	2,5
230	185	3,5	3	230	250	3	2,5
230	250	3,5	2,5	230	250	3	2,5
230	220	3	2	230	250	3	2
230	40	3	2	230	250	3	2
230	210	3,5	2,5	230	250	3	2,5
230	250	3,5	2,5	230	250	3	2
220	210	4	2,5	230	250	3	2,5
230	190	4	3	230	250	3	2,5
230	170	3,5	3	230	250	3	2
230	220	3,5	3	230	250	3	2,5
230	190	3,5	2,5	230	250	3	2,5
230	250	3,5	2	230	250	3	2
230	230	3,5	2	230	250	3	2

230	250	3	2,5	230	250	3	2,5
230	170	3	2,5	230	250	3	2,5
230	200	3,5	2,5	230	250	3	2
230	230	4	2,5	230	250	3	2
230	240	3,5	2	230	250	3	2,5
230	235	3,5	2	230	250	3	2
230	240	3,5	2	230	250	3	2,5
230	240	3,5	2	230	250	3	2

h = 0,45 мм											
9 кВ				10 кВ				11 кВ			
ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс
270	250	4	2,5	265	220	3	2	260	220	2,5	2
270	250	4	2,5	265	220	3	2	260	220	3	1,5
270	250	4	2,5	265	220	3	2	260	220	3	1,5
270	250	4,5	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
270	250	4,5	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
265	230	4,5	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	3	2,5
265	230	4	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	2,5	2,5
265	230	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	2,5	2
265	230	4	2,5	265	220	3	2	260	220	3	2
265	230	4,5	2,5	265	220	3	1,8	260	220	3	1,5
270	225	4,5	2,5	265	220	3	1,8	260	220	3	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3	2	260	220	3	1,5
270	225	4,5	2,5	265	220	3	2,5	260	220	3	1,5
270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	2,5	2
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	2,5	2
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2,5
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	1,5
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	1,5
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	2,5	2
270	225	4	2,5	265	220	3	2,5	260	220	2,5	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3	2,5	260	220	2,5	2,5
270	225	4,5	2,5	265	220	3	2,5	260	220	3	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	3	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	3	2,5
270	250	4,5	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
270	250	4,5	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
270	250	4,5	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
270	250	4,5	2,5	265	220	3	2	260	220	3	2
270	250	4,5	2,5	265	220	3	2	260	220	3	2
265	230	4,5	2,5	265	220	3	2,5	260	220	3	2,5
265	230	4	2,5	265	220	3	2,5	260	220	3	2,5
265	230	4	2,5	265	220	3	2,5	260	220	3	2
265	230	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
265	230	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2,5
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	3	2
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	2,5	2
270	225	4	2,5	265	220	3,5	2	260	220	2,5	2
270	225	4	2,5	265	220	3	2	260	220	3	2,5
270	225	4	2,5	265	220	3	2,5	260	220	3	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3	2,5	260	220	3	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	2,5	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	3	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2	260	220	2,5	2,5

270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2	260	220	3	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	3	2
270	225	4,5	2,5	265	220	3,5	2,5	260	220	3	2,5

h = 0,5 мм											
9 кВ				10 кВ				11 кВ			
ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс	ЧР+, мВ	ЧР-, мВ	tчр+, мс	tчр-, мс
280	210	4,5	2	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2
280	210	4,5	2	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2,5
100	210	4,5	2	260	220	3,5	2,5	235	235	2,5	2
200	110	4,5	2,5	260	220	3,5	2,5	235	235	3	1,5
280	200	4,5	2,5	260	220	3,5	2	235	235	3	2
280	210	4	2,5	260	220	3,5	2	235	235	3	1,5
280	210	4	3	260	220	3	2	235	235	3	2
280	210	4	3	260	220	3	2	235	235	2,5	2
280	210	4	3	260	220	3,5	2	235	235	3	1,5
280	210	4	3	260	220	3,5	2	235	235	3	2,5
280	210	4	2	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2
280	210	4,5	2	185	220	3,5	2,5	235	235	3	1,5
210	210	4,5	2,5	260	220	3,5	2,5	235	235	2,5	2
280	210	4,5	2,5	185	220	3,5	2,5	235	235	3	2,5
280	210	4	2,5	260	220	3,5	2	235	235	2,5	1,5
265	220	4	2	220	220	3,5	2	235	235	3	2
265	220	4	2	260	220	3,5	2	235	235	3	2,5
265	220	4	2	230	220	3,5	2	235	235	3	2
230	220	4	3	190	220	3,5	2	235	235	3	1,5
265	220	4	3	260	220	3,5	2	235	235	2,5	2
265	230	4,5	3	260	220	3,5	2	235	235	3	1,5
210	230	4,5	2,5	260	220	3,5	2	235	235	3	2
265	230	4,5	2,5	260	220	3,5	2	235	235	3	2
265	230	4	2,5	260	220	3,5	2	235	235	3	1,5
265	230	4	3	260	220	3,5	2,5	235	235	2,5	2,5
280	210	4	3	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2
280	210	4	3	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2
100	210	4	3	260	220	3,5	2,5	235	235	2,5	2
200	110	4,5	2	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2,5
280	200	4,5	2	260	220	3,5	2,5	235	235	3	1,5
280	210	4,5	2,5	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2
280	210	4,5	2,5	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2,5
280	210	4	2,5	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2
280	210	4	2,5	260	220	3,5	2	235	235	2,5	1,5
280	210	4	2	260	220	3,5	2	235	235	3	2
280	210	4	2	260	220	3,5	2	235	235	3	2
280	210	4	2	185	220	3,5	2	235	235	3	2
210	210	4	2	260	220	3	2	235	235	3	2
280	210	4,5	2	185	220	3	2	235	235	2,5	2
280	210	4,5	2,5	260	220	3	2	235	235	3	2,5
265	220	4,5	2,5	220	220	3	2,5	235	235	3	2
265	220	4	2,5	260	220	3,5	2,5	235	235	3	2
265	220	4	3	230	220	3,5	2,5	235	235	3	2
230	220	4	3	190	220	3,5	2,5	235	235	2,5	2,5
265	220	4	3	260	220	3,5	2	235	235	3	2
265	230	4	3	260	220	3,5	2	235	235	3	2
210	230	4	2,5	260	220	3	2	235	235	3	2
265	230	4	2,5	260	220	3	2	235	235	3	2
265	230	4,5	2,5	260	220	3	2	235	235	3	2,5
265	230	4,5	2,5	260	220	3	2	235	235	3	2

ПРИЛОЖЕНИЕ 4



ПРИЛОЖЕНИЕ 5: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № № 2026669962 «Программа расчета параметров частичных разрядов в газовых дефектах изоляции высоковольтного электрооборудования»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026669962

Программа расчета параметров частичных разрядов (ЧР) в газовых дефектах изоляции высоковольтного электрооборудования

Правообладатель: ***ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ" (RU)***

Авторы: ***Ньетерейе Фредерик (BI), Усачев Александр Евгеньевич (RU), Кубарев Артём Юрьевич (RU)***

Заявка № **2026668529**
Дата поступления **05 июня 2026 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***10 июля 2026 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7ad8d531b4b8818e75f29506
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 6:Акты внедрения результатов диссертации

KR GROUP

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель Генерального директора
по производству ООО «УК «КЭР – Холдинг»
_____П.В. Емельянов
«28» 09 2026 г.

АКТ
о внедрении результатов диссертационного исследования
«Разработка методики определения размеров внутренних газовых дефектов изоляционных конструкций по характеристикам частичных разрядов»
аспиранта кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова»
ФГБОУ ВПО Казанского государственного энергетического университета
Ньетерейе Фредерик,
представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждаем, что при проведении работ по разработе и созданию новых перспективных алгоитмов мониторинга состояния электротехнического оборудования используются следующие результаты диссертационного исследования:

1. новая методика оценки размеров газовых дефектов в изоляционных материалах по характеристикам частичных разрядов;
2. принципы отделения ЧР в газовых дефектах изоляции, приводящие к её деградации, от коронных и поверхностных разрядов по: временному признаку, повторяемости, по характеру распределения по фазовым углам синусоиды промышленной частоты, возможности наблюдения сигналов ЧР от других фаз.

Результаты диссертации Ньетерейе Ф. можно рекомендовать к использованию на любых электрических станциях или в организациях, занимающихся контролем состояния электротехнического оборудования методом частичных разрядов.

Председатель комиссии:

Зам. генерального директора по производству _____П.В. Емельянов

Члены комиссии:
Директор по подготовке проектов _____Р.Р. Азизов

Директор по реализации проектов, канд. тех. наук _____М.В. Чубуков

ООО «УК «КЭР-Холдинг», 420036, Республика Татарстан, ул. Восход, 45
+7(843) 572-09-99
office@ker-holding.ru www.ker-holding.ru
ИНН: 1657048240, КПП: 166101001, ОКПО: 72651401, ОГРН: 1041625404150

№ 222-03/4786
от 01.10.2026г.

УТВЕРЖДАЮ
И.о. главного инженера
ООО ИЦ «Энергопрогресс»
_____ И.Р.Салахов
«01» октября 2026 г.

АКТ
о внедрении результатов диссертационного исследования
«Разработка методики определения размеров внутренних газовых дефектов изоляционных конструкций по характеристикам частичных разрядов»
аспиранта кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова»
ФГБОУ ВПО Казанского государственного энергетического университета
Ньетерейе Фредерик,
представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждаем, что при проведении работ по контролю состояния изоляции электрооборудования высокого нпряжения методом частичных разрядов (ЧР), которые наша организация проводит регулярно, были внедрены и используются следующие результаты диссертационного исследования Ньетерейе Ф.:

1. новая методика оценки размеров газовых дефектов в изоляционных материалах по характеристикам частичных разрядов;

2. диагностический признак: частичные разряды, возникающие в газовых дефектах, происходят по одному разу в четвертях синусоиды промышленной частоты, в которых модуль напряжения возрастает, т. е. частота ЧР для одиночного равна 100 Гц;

3. экспериментально доказанное отсутствие остающегося объёмного заряда к моменту повторного ЧР в той же каверне дефекта через половину периода синусоиды промышленной частоты, что приводит к необходимости учитывать в датчиках ЧР в каждой фазы электрооборудования появления ЧР от других фаз со сдвигом на ÷120°..

Использование результатов диссертационного исследования Ньетерейе Ф. позволило применить новое представление результатов измерений частичных разрядов в изоляции высоковольтного электрооборудования. В этом представлении амплитуды и фазы ЧР заменяются размерами дефектов в изоляции, что делает его более понятным и наглядным для работников энергетических предприятий. Результаты диссертации Ньетерейе Ф.. можно рекомендовать к использованию на любых электрических станциях или в организациях, занимающихся контролем состояния изоляции высоковольтного электроборудования методом частичных разрядов.

Председатель комиссии:

Начальник коммерческого отдела, канд.техн.наук _____ И.Р.Калимуллин

Члены комиссии:

Начальник службы Электротехнического оборудования _____ В.А. Сопин

Начальник отдела перспективного развития _____ Б.Ф.Тимершин

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

КГЭУ

УТВЕРЖДАЮ:
Первый проректор-проректор по УР
Леонтьев Александр Васильевич
«24» 09. 2026г.

Акт о внедрении результатов диссертации

Настоящий актом подтверждается, что результаты диссертационного исследования «Разработка методики определения размеров внутренних газовых дефектов изоляционных конструкций по характеристикам частичных разрядов» аспиранта кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» ФГБОУ ВО Казанского государственного энергетического университета Ньетерейе Фредерик, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, актуальны и соответствуют современному уровню научных инновационных технологий, и используются для обеспечения учебного процесса в рамках проведения лабораторных занятий по дисциплине «Техника высоких напряжений», «Диагностика электрооборудования».

Директор Институт электроэнергетики и электроники (ИЭЭ) _____ Р. Р. Гибадуллин

И.о. заведующего кафедрой «Электрические станции им. В.К. Шибанова» _____ Р.Э. Абдуллазянов

Научный руководитель, профессор кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» _____ А.Е. Усачев