

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Марюшко Егор Андреевич

**МЕТОД ЭКСПРЕСС ДИАГНОСТИКИ КОМПЛЕКТНЫХ
ЭЛЕГАЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПО
ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Овсянников

Александр Георгиевич

Новосибирск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....		4
1	АНАЛИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ И МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОМПЛЕКТНЫХ ЭЛЕГАЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.....	10
1.1	Общие сведения.....	10
1.2	Методы регистрации утечек элегаза.....	15
1.3	Физико-химические анализы элегаза.....	19
1.4	Переходные процессы и высокочастотные перенапряжения в КРУЭ.....	23
1.5	Загрязнение КРУЭ частицами	26
1.6	Опорные изоляторы.....	28
1.7	Частичные разряды в КРУЭ.....	32
1.8	Методы калибровки датчиков ЧР.....	58
1.9	Выводы по разделу и постановка задач исследований.....	59
2	РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУЭ.....	61
2.1	Экспресс диагностика.....	61
2.2	Анализ конструктивных особенностей КРУЭ.....	62
2.3	Измерение сигналов частичных разрядов.....	68
2.4	Методы снижения внешних и внутренних помех.....	75
2.5	Определение места расположения источника ЧР.....	84
2.6	Определение возможных причин возникновения ЧР и степени опасности для дальнейшей эксплуатации оборудования...	86
2.7	Выводы по разделу.....	90
3	ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЭКСПРЕСС ДИАГНОСТИКИ ЧР НА ПРИМЕРЕ КРУЭ 220 кВ ПС «ВЛАСИХА».....	91
3.1	Конструкция обследованного КРУЭ.....	91

3.2	Применяемые измерительные приборы и датчики.....	97
3.3	Выполненные измерения и анализ полученных сигналов.....	98
3.4	Определение типа дефекта и степени его опасности.....	110
3.5	Выводы по разделу.....	112
4	ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВВОДАХ	
	«ВОЗДУХ – ЭЛЕГАЗ».....	113
4.1	Конструктивные особенности воздушных вводов.....	113
4.2	Исследование структуры RIP изоляции капиллярными методами..	116
4.3	Влияние неровностей обкладок на напряжённость электрического поля.....	126
4.4	Механические напряжения во вводах.....	128
4.5	Диагностирование вводов с RIP-изоляцией.....	128
4.6	Расчётов кажущегося и истинного зарядов ЧР во вводах с изоля- цией конденсаторного типа.....	129
4.7	Воздействие ЧР на изоляцию вводов.....	132
4.8	Выводы по разделу.....	134
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
	СОКРАЩЕНИЯ	138
	ТЕРМИНЫ	139
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	141
	Приложение А. Характеристики, схема и компоновка КРУЭ 220 кВ на подстанции «Власиха» 220 кВ».....	157
	Приложение Б. Копии сопроводительных документов.....	161

ВВЕДЕНИЕ

В современной отечественной и мировой энергетике при новом строительстве и реконструкции всё чаще применяется оборудование с элегазовой изоляцией: комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ), высоковольтные выключатели, трансформаторы тока и напряжения, газоизолированные линии, силовые и измерительные трансформаторы. Элегаз получил имя и путёвку в жизнь, которая длится без малого век, благодаря исследованиям Б.М. Гохберга, впервые обратившем внимание на высокие изоляционные и дугогасящие свойства элегаза. Оборудование с элегазовой изоляцией обладает высокой надёжностью, компактными размерами, низкой пожароопасностью, экологической безопасностью и другими преимуществами.

В России большой вклад в разработку конструкций КРУЭ и методов их обслуживания внесли коллективы Всероссийского электротехнического института и НИИ высоковольтной аппаратуры и их сотрудники В.Г. Аракелян, И.М. Бортник, Ю.И. Вишневский, Г.Е. Агафонов и др.

Испытания, которые проводятся во время производства и монтажа КРУЭ не позволяют выявить все имеющиеся дефекты, в результате, часть дефектов остаётся скрытыми и проявляет себя уже в процессе эксплуатации. По статистике более 30% всех аварий в КРУЭ происходят из-за развития скрытых и возникших в процессе эксплуатации дефектов. Поэтому выявление дефектов на ранней стадии развития в процессе эксплуатации оборудования является единственным способом предотвратить финансовые потери, связанные с отказом оборудования.

Наиболее распространённые дефекты КРУЭ можно разделить на две группы: контролируемые по утечкам и составу элегаза и контролируемые по интенсивности частичных разрядов (ЧР). Сегодня можно считать практически решённой задачу диагностирования первой группы дефектов КРУЭ. При этом надо отметить успех данной дефектоскопии не только во время приёмо-сдаточных испытаний, а и в процессе эксплуатации.

Разработки методик регистрации характеристик ЧР проводились в ОРГРЭС, ВЭИ, ВНИИЭ, СибНИИЭ, ЗТЗ-Сервис, Димрус и других организациях. С ними неразрывно связаны имена таких специалистов как В.П. Вдовико, А.Е. Монастырский, А.Г. Овсянников, Н.В. Киншт, В.А. Русов и др.

К сожалению, контроль интенсивности ЧР в КРУЭ до сих пор проводится, в основном, на этапе приёмо-сдаточных и пусковых испытаний и значительно реже – в периоды отключения оборудования для планового технического обслуживания. С учётом срока эксплуатации КРУЭ и межсервисных интервалов, вероятность пропуска этапа развития дефекта остаётся весьма заметной. Кардинальным решением проблемы предотвращения отказов КРУЭ мог бы стать непрерывный диагностический мониторинг, однако, высокая стоимость систем мониторинга оправдывает их установку в исключительных случаях. По этим причинам разработка недорогих и эффективных методов экспресс диагностики по характеристикам ЧР без вмешательства в работу КРУЭ является актуальной задачей.

Проблемой, сопутствующей регистрации ЧР, является получение достоверных данных в условиях сложной электромагнитной обстановки, являющейся неотъемлемым признаком объектов электроэнергетики. Несмотря на многие достижения в этой области, разработка методов и средств для борьбы с помехами остаётся востребованной и сегодня.

В последние годы широкое распространение получили, вводы высокого напряжения с RIP (Resin Impregnated Paper) изоляцией, технологические отказы которых имели место в период с 2009-2010 гг. Между тем, вводы с твёрдой изоляции имеют хорошие перспективы применения в КРУЭ, поэтому представляло интерес разобраться в возможных причинах отказов изоляции данного типа.

Подводя итог сказанному, подчеркнём, что разработка методов экспресс контроля технического состояния КРУЭ играет важную роль в обеспечении нормального функционирования процесса генерации и передачи электрической энергии. Поэтому исследования, направленные на решение указанных проблем, сохраняют свою **актуальность**.

Объектами исследования являются КРУЭ на напряжение 110 кВ и выше.

Предметом исследования являются методы регистрации ЧР в КРУЭ и вводах высокого напряжения типа «воздух – элегаз», интерпретации измеренных сигналов для селекции от помех, локации места расположения очага ЧР, определения вида дефекта и оценки его опасности для продолжения эксплуатации.

Целью работы является совершенствование метода диагностирования по характеристикам ЧР КРУЭ, находящегося в работе.

Для достижения цели в работе ставились и решались следующие научно-технические задачи.

~ Разработать метод экспресс регистрации ЧР в КРУЭ без его вывода из эксплуатации и вмешательства в его конструкцию.

~ Разработать алгоритм расчёта количества датчиков для наиболее эффективной регистрации ЧР в КРУЭ.

~ Разработать технические решения для помехозащищённой регистрации ЧР в работающем КРУЭ в условиях действующей подстанции.

~ С учётом разработанных рекомендаций по проведению экспресс диагностики выполнить измерение активности ЧР в действующем КРУЭ.

~ Исследовать причины отказов вводов «воздух – элегаз» и их модификации с твёрдой RIP изоляцией.

Методы исследования. В процессе выполнения работы проводился анализ литературных данных по тематике исследований, физическое и математическое моделирование устройств защиты сигнала от внешних помех; проводились измерения характеристик ЧР в лаборатории и в условиях эксплуатации, применялись цифровые методы анализа и обработки сигналов ЧР.

Научная новизна характеризуется следующими достижениями.

1 Разработан алгоритм расчёта числа и выбора схемы расстановки датчиков ЧР, основанный на конструктивных особенностях КРУЭ и время-пролётном (волновом) методе локации очага ЧР, позволяющий при минимальном количестве датчиков контролировать все газоизолированные отсеки КРУЭ.

2 Установлено, что в изоляции конденсаторного типа содержащей N слоёв, разделённых уравнительными обкладками, кажущийся заряд ЧР может быть в N

раз меньше, если очаг ЧР расположен между обкладками, по сравнению с теми ЧР, очаги которых расположены за границами обкладок.

3 В RIP – изоляции вводов высокого напряжения типа «воздух – элегаз» экспериментально измерены распределения газовых пор и капилляров по диаметрам. Полученные данные, подтверждают высокое качество изготовления, в целом, но не опровергают наличие отдельных сквозных капилляров в компаунде. В результате компьютерного моделирования установлено, что напряжённость электрического поля на неровностях обкладок, повторяющих складки изоляционной бумаги, может превышать среднюю напряжённость в два и более раз.

Положения, выносимые на защиту:

1 Выбор числа и схемы расстановки датчиков ЧР должен производиться таким образом, чтобы обнаружить разрядную активность в любой части всего объёма КРУЭ и в любом из его элементов. При этом использование временной задержки появления сигналов и учёта их затухания при распространении на пути от очага ЧР до датчика обеспечивает эффективный контроль внутреннего объёма всех газоизолированных отсеков при минимальном количестве используемых датчиков ЧР.

2 Величина кажущегося заряда ЧР зависит не только от дефекта, но и от места его расположения. В аппаратах с изоляцией конденсаторного типа измеренный кажущийся заряд ЧР может оказаться в N раз меньше, в случае, если очаг ЧР расположен между обкладками, по сравнению со случаем, когда очаг ЧР расположен вне слоя изоляции между проводящими обкладками.

3 Исследование капиллярными методами структуры RIP – изоляции вводов высокого напряжения типа «воздух – элегаз» дают прямой ответ относительно пористости материала и качестве его изготовления. При выборе рабочей напряжённости электрического поля в RIP – изоляции необходимо учитывать усиления электрического поля на бугорках уравнивающих обкладок.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании возможности экспресс диагностирования КРУЭ, без вмешательства в его работу, путём ре-

гистрации электрических сигналов ЧР с помощью временно устанавливаемых датчиков электрических сигналов.

Практическую значимость имеют следующие технические предложения. Для регистрации электрических сигналов ЧР в условиях большого уровня помех предложены и испытаны схема оптоволоконной передачи сигнала и фильтр верхних частот в виде отрезка коаксиального кабеля, закороченного со стороны заземления, с согласующим сопротивлением. Принципиально возможно и практическое воплощение двух предложенных автором идей имитации ЧР с помощью полых микросфер с твёрдой оболочкой или полосковых линий.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечена применением поверенных измерительных приборов, а достоверность расчётов – применением лицензионного программного обеспечения. Обоснованность выводов и рекомендаций работы подтверждена публикациями и обсуждениями результатов исследований на научно-технических форумах.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы обсуждались на научных семинарах филиала ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС» - Новосибирской СПБ и кафедры «Техники и электрофизики высоких напряжений» НГТУ; на VII международн. н.-практ. конф. «Перенапряжения и надёжность эксплуатации электрооборудования», Санкт-Петербург, 2014; на I международн. конф. «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», Новосибирск, 2014; на IX и X научно-практическом семинаре Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока. Красноярск, Дивногорск, 2014, Новосибирск, 2015; на V и VI международн. н.-практ. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи», Томск, 2014, Иваново, 2015. В 2013 г. на 112-м международном салоне изобретений «Конкурс Лепин» проект «Волоконно-оптического измерительного тракта» удостоен диплома и медали Ассоциации изобретателей и производителей Франции (приложение Б); в 2014 г. автор прошёл месячную стажировку по теме регистрации ЧР в КРУЭ в Корейском электротехническом научно-исследовательском институте, город Чангвон, Республика Корея, в 2016 г. – автор принял участие в работе молодеж-

ной секции 46-й сессии СИГРЭ, Париж, Франция.

Основные результаты исследований опубликованы в 4 статьях из перечня ВАК, 1 патенте и 8 публикациях в других изданиях.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка сокращений и терминов, списка литературы из 141 наименований и 2 приложений. Содержание изложено на 163 страницах машинописного текста, который поясняется 106 рисунками и 6 таблицами.

1 АНАЛИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ И МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОМПЛЕКТНЫХ ЭЛЕГАЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

1.1 Общие сведения

Название «электротехнический газ» или «элегаз» применительно к шестифтористой сере (SF_6) было предложено Борисом Михайловичем Гохбергом [1] под впечатлением от высокой электрической прочности и дугогасительной способности исследованного химического соединения.

Уже в начале пятидесятых годов в США появились выключатели с использованием SF_6 в качестве изоляционной и дугогасящей среды, а к концу шестидесятых годов их уже производили ведущие фирмы Европы, Америки и Японии. Комплектные распределительные устройства в металлической оболочке с элегазовой изоляцией (КРУЭ) начали применяться за рубежом почти 80 лет назад, а первые отечественные КРУЭ были разработаны и изготовлены в 70-х годах прошлого века. В те годы А.И. Полтев [2] справедливо отмечал, что практическое использование элегаза в электротехнике опередило его всестороннее исследование.

В значительной мере пробел в исследованиях физико-химических свойств элегаза и методах контроля его состояния в процессе эксплуатации КРУЭ был восполнен в монографиях сотрудников ВЭИ им. Ленина в [3, 4] и НИИВА [5]. Опыт этих и других организаций в разработке электротехнического оборудования с элегазовой изоляцией разных классов напряжения отразился в общих технических требованиях к КРУЭ [6] и к элегазовым токопроводам [7] в стандартах ПАО «ФСК ЕЭС», гармонизированных с международными стандартами [8, 9].

Перспективы внедрения КРУЭ в российской электроэнергетике достаточно ясно очерчены в [10]. Наряду с импортом продукции ведущих зарубежных производителей [11 – 13] быстрыми темпами развивается и серийное производство отечественных КРУЭ [14, 15]. Сегодня в России функционируют более 120 КРУЭ разных производителей и разных классов напряжения.

Комплектное распределительное устройство включает в себя главные токоведущие цепи и отдельные аппаратные элементы, заключенные в герметическую металлическую оболочку с вводами высокого напряжения, заполненную элегазом. КРУЭ представляет собой комплекс функциональных элементов, смонтированных в соответствии с заданной схемой. Небольшим количеством модулей (рисунок 1.1) возможна реализация всех возможных электрических схем распределительных устройств (РУ).

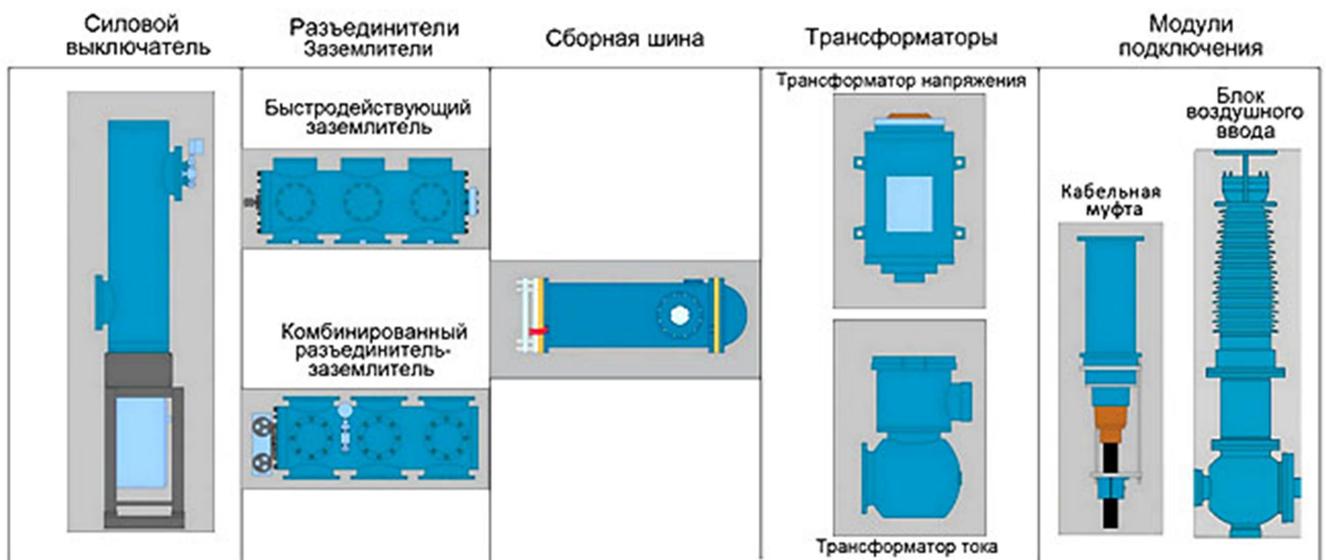


Рисунок 1.1 – Модули комплектных элегазовых устройств

КРУЭ имеет ряд преимуществ перед традиционными РУ, обуславливающих существенное повышение надежности и безопасности при снижении эксплуатационных затрат.

~ Благодаря компактности, КРУЭ требует значительно меньшей площади для размещения, чем открытые РУ (рисунок 1.2). По этой причине КРУЭ можно размещать внутри зданий и даже под землёй в городах или в районах с высокой плотностью населения и высокой стоимостью земли. Размещение КРУЭ в зданиях позволяет сохранить эстетичный вид застройки.

~ Растущий спрос на электроэнергию требует глубокого ввода в городскую зону линий электропередачи всё более высоких классов напряжения. Применение

подземных кабелей или газоизолированных линий совместно с КРУЭ в этих случаях не имеет альтернативы.

~ Почти все производители КРУЭ поставляют ячейки в полностью собранном виде, что позволяет заметно сократить сроки и стоимость строительства и ввода в эксплуатацию объекта.

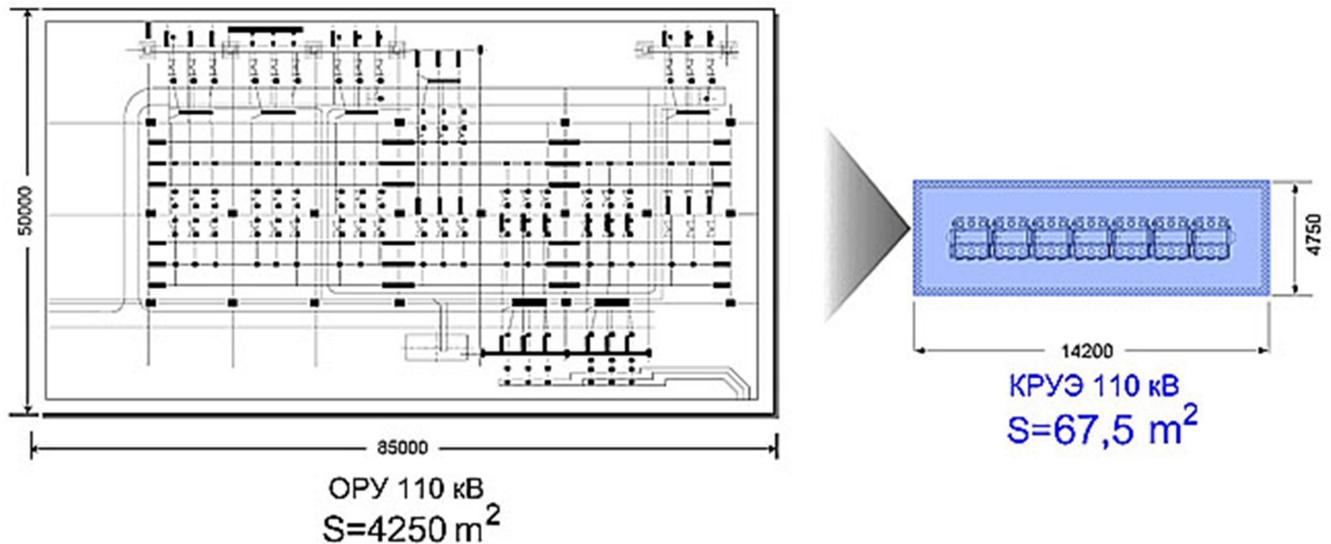


Рисунок 1.2 – Сравнение площадей открытого и элегазового распределительных устройств 110 кВ, выполненных по схеме «2 системы сборных шин без обходной» в масштабе 1:63

~ Герметизированная конструкция оборудования устраняет влияние атмосферных воздействий на работу изоляции и обеспечивает защиту обслуживающего персонала от воздействия электрических и магнитных полей, снижает уровень шума и уровень радиопомех при эксплуатации КРУЭ. Неправильное оперирование коммутационными аппаратами исключается с помощью электрических и механических блокировок.

~ Последствия случайно возникшей дуги перекрытия локализируются в пределах того отсека, в котором дуга имела место. Секционирование обеспечивает взрывобезопасность и быстрое восстановление функционирования КРУЭ.

~ Современные КРУЭ нуждаются в минимальном техническом обслуживании и, тем самым, приближаются к категории необслуживаемого оборудования.

В таблице 1.1 приведены данные опроса СИГРЭ по аварийным отказам отдельных элементов КРУЭ разных классов напряжения и разных производителей.

Таблица 1.1 – Данные опроса СИГРЭ по аварийности элементов комплектных распределительных устройств с элегазовым наполнением

Компоненты с аварийными отказами	В целом, %	По классам напряжения, %	
		100 – 200 кВ	200 – 700 кВ
Общее число аварийных отказов	100 (801 шт.)	54,7	29,9
Выключатель или отключатель	43,4	54,7	29,9
Разъединитель	17,9	17,2	18,2
Отсеки и соединительные части	11,9	4,1	22,4
Трансформатор напряжения	5,6	6,2	4,8
Главные токоведущие части	5,5	3,7	6,9
Заземлитель	4,4	5,3	3,6
Вводы «воздух-элегаз»	3,6	0,9	6,9
Трансформатор тока	0,9	0,7	1,2
Прочие	5,9	7,0	4,5

Как видно из представленных в таблице 1.1 данных наиболее слабыми элементами КРУЭ являются выключатели и разъединители. В меньшей степени повреждаются отсеки в целом, трансформаторы напряжения и вводы «воздух-элегаз». Следует отметить, что в большинстве случаев отказывают изоляционные конструкции этих элементов, а они в свою очередь, во многом повреждаются или стареют под действием частичных разрядов (ЧР).

На рисунке 1.3 приведено распределение отказов по причинам. В динамике отказов отчётливо прослеживается пик приработочных отказов в начальный период эксплуатации (рисунок 1.4). Он в какой-то мере объясняется дефектами кон-

струирования, производства и монтажа (рисунок 1.3). Небольшой российский опыт внедрения КРУЭ имеет схожие черты.



Рисунок 1.3 – Распределение отказов КРУЭ по первопричинам

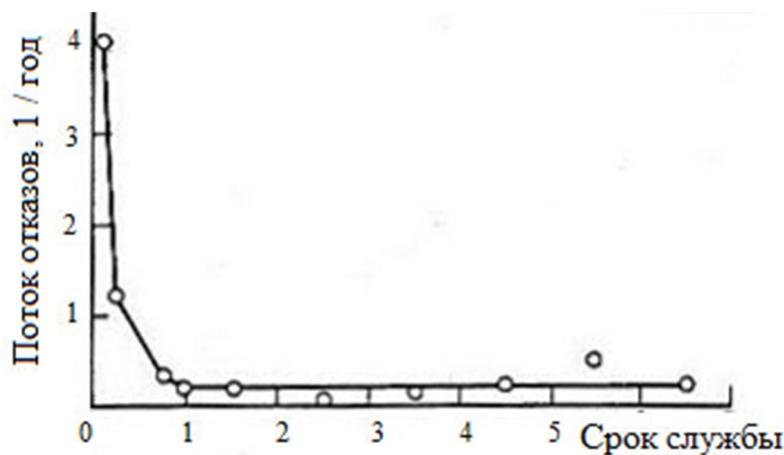


Рисунок 1.4 – Статистика отказов по годам эксплуатации 25 КРУЭ в США

Несмотря на высокую надежность КРУЭ, и производители, и пользователи должны быть осведомлены о некоторых проблемах изоляции:

- ~ побочные продукты разложения элегаза от дуги и от ЧР;
- ~ экологическая опасность элегаза;

- ~ генерация ВЧ перенапряжений при коммутациях;
- ~ надёжность опорных изоляторов;
- ~ загрязнение элегаза металлическими частицами.

Диагностические методы выявления и идентификации дефектов в ГИС были предложены СИГРЭ. Многие ошибки в монтаже и недостаточно эффективные процедуры обеспечения качества могут привести к мощным ЧР, которые в присутствии влаги приводят к появлению токсичных побочных продуктов элегаза.

Новые методы для обнаружения и локации ЧР и автоматизированные системы мониторинга состояния изоляции, признаются самыми важными событиями в оценке состояния КРУЭ.

Типичными дефектами КРУЭ являются:

- ~ утечки элегаза;
- ~ загрязнение элегаза металлическими или диэлектрическими частицами;
- ~ загрязнение элегаза продуктами горения дуги;
- ~ шероховатости, выступы и заусенцы на токоведущих частях;
- ~ внутренние дефекты опорной изоляции в виде газовых полостей, отслоений или трещин.

За исключением утечек все остальные дефекты являются потенциальными очагами возникновения частичных разрядов (ЧР) и, соответственно, могут быть выявлены при регистрации тех или иных характеристик ЧР.

1.2 Методы регистрации утечек элегаза

Утечки возникают в результате дефектов уплотнительных прокладок в местах соединения различных элементов КРУЭ или через микротрещины в элементах оборудования, не выявленные в результате заводских испытаний или возникшие в процессе эксплуатации оборудования. Утечки элегаза приводят к технологическим нарушениям и экологическим последствиям.

Чистый элегаз не оказывает токсического, генетического или канцерогенного влияния на здоровье человека, однако элегаз получаемый промышленным спосо-

бом не является идеально чистым, поэтому его предельно допустимая концентрация в рабочей зоне составляет 0,08% по объёму или 5000 мг/м³ [6].

Так же в процессе эксплуатации в результате коммутаций номинальных токов, токов короткого замыкания и частичных разрядов, появляются высокотоксичные продукты разложения элегаза, которые представляют опасность для человека. Наиболее опасным из них считается тионилфторид SOF₂.

В соответствии с Киотским протоколом, подписанным в 1997 году, элегаз включён в список газов ускоряющих парниковый эффект [16, 17]. В 2015 году на Парижской конференции по изменению климата 196 государств приняли «Рамочную конвенцию об изменении климата». Основным положением данной конвенции является снижение выбросов парниковых газов в атмосферу в период до 2020 года для удержания прироста глобальной средней температура на уровне ниже 2 °С сверх доиндустриальных уровней. Следствием ратификации данного соглашения будет, в том числе, ужесточение контроля за утечками элегаза в атмосферу.

Элегазовое оборудование высокого напряжения работает при повышенном давлении (от трёх до семи атмосфер в зависимости от класса напряжения и типа оборудования [6, 7]), для обеспечения требуемой диэлектрической прочности и дугогасительных свойств изоляционной среды. Критическое снижение внутреннего давления в отдельных блоках КРУЭ может привести к электрическому пробою изоляции или к отказу выключателя во время гашения дуги, вследствие чего будет необходим длительный и дорогостоящий ремонт оборудования.

КРУЭ представляет собой замкнутую систему давления, состоящую из автономных систем давления. Автономной системой давления газа в КРУЭ является одиночный газоизолированный отсек. В соответствии с [6] для оборудования выше 110 кВ время между подпитками газом должно быть не менее чем 1 месяц, а рекомендуемый уровень утечки в атмосферу и между отсеками не должен превышать 0,5 % в год. Различие допустимого уровня утечки для автономной системы давления и замкнутой системы давления объясняются тем, замкнутая система давления является более крупным объектом и может состоять из десятков автономных систем и соответственно содержит значительно больший объём газа. В

связи с этим к замкнутым системам давления предъявляются более жёсткие требования: для них допустимым уровнем утечки газа является 0,1 % в год.

Все средства диагностирования и контроля утечек элегаза можно косвенно разделить на две категории: сигнализирующие о наличии утечки и указывающие место утечки. В задачи сигнализирующих датчиков входит информирование эксплуатирующего персонала о пониженном давлении внутри оборудования или о превышении допустимого уровня концентрации в помещении, где расположено оборудование.

К сигнализирующим датчикам относятся:

- ~ датчик давления с температурной компенсацией или выключатель с контактами подачи сигнала тревоги [6, 18];
- ~ манометр с отдельными реле плотности (рисунок 1.5,а);
- ~ датчик давления с отдельной температурной компенсацией;
- ~ датчик плотности, независимый от температуры;
- ~ датчик контроля концентрации элегаза в воздухе (рисунок 1.5,б).



а



б

Рисунок 1.5 – Датчики давления (а) и концентрации (б) элегаза в воздухе

Течеискатели (рисунок 1.6,а) имеют высокую пороговую чувствительность по обнаружению элегаза в воздухе, которая соответствует концентрации в 1 ppb ($0,65 \cdot 10^{-8}$ г/л), и чувствительность к натеканию элегаза: до 0,0002 г/год [19 – 21].

Эффективное использование течеискателей возможно только в непосредственной близости от оборудования, т.е. на расстоянии не более 0,5 метров [20] и

при отсутствии интенсивной циркуляции окружающего воздуха. По этим причинам обследование оборудования расположенного вне помещений возможно только в безветренную погоду. Специализированные тепловизоры (рисунок 1.6,б), которые имеют спектральную чувствительность, совпадающую с полосой основного поглощения элегаза, позволяют фиксировать даже очень слабую утечку. Таким является, например, американский тепловизор GF – 306 с полосой чувствительности в диапазоне длин волн (10,3 – 10,7) мкм [22].



а



б

Рисунок 1.6 – течеискатель «SF₆ LaserGasTest» (а) и тепловизор GF-306 (б)

Утечка на его экране выглядит, как дым от сигареты (рисунок 1.7), таким образом, место дефекта легко обнаруживается.

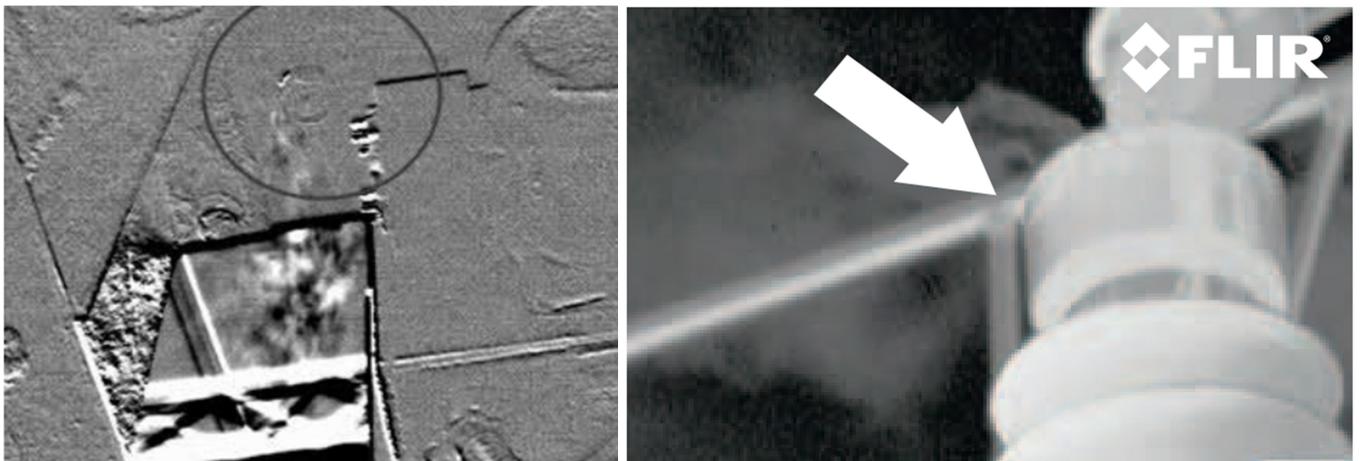


Рисунок 1.7 – Визуализация утечек элегаза с помощью тепловизора

Использование тепловизоров обеспечивает дистанционное обследование работающего оборудования на безопасном расстоянии от него с получением общей картины состояния оборудования.

Стремление к замене элегаза другим безопасным с экологической точки зрения газом или, хотя бы смесью элегаза с каким-либо безопасным газом проявлялось исследователями с самого начала «эры КРУЭ». В данном обзоре автор ограничился только одной из публикаций, посвящённых смеси элегаза с азотом [23]. Эта смесь, почти не потеряв ценных качеств элегаза, существенно снизила температуру сжижения, что было очень важно для распространения элегазовых аппаратов в северные и другие районы с жёстким зимним климатом.

1.3 Физико-химические анализы элегаза

В элегазовом высоковольтном оборудовании под действием дуговых, искровых, коронных или частичных разрядов из химически инертной шестифтористой серы образуются агрессивные химические соединения. Состав продуктов разложения элегаза во многом зависит от типа разряда и вида воздействия, а степень разложения зависит от энергии разрядов и уровня загрязнения зоны развития разряда. В качестве первичных продуктов распада чистой шестифтористой серы можно выделить фтор, четырёхфтористую и двухфтористую серу, а прочие химические соединения являются следствием вторичных реакций [3, 5, 24 – 29].

Практически все вещества, образовавшиеся в результате протекания разрядов в элегазе, являются ядовитыми. Помимо продуктов распада важными для контроля параметрами являются влажность и кислотность элегаза [3, 5, 30 – 32]. Это обусловлено следующими причинами, при снижении температуры окружающей среды и охлаждении оборудования повышенное содержание влаги в элегазовой изоляции может привести к выпадению росы на внутренних стенках оборудования и резкому снижению электрической прочности изоляции. В свою очередь повышенный уровень кислотности элегаза приводит к ускоренной деградации

опорной изоляции, уплотнительных прокладок и эрозии контактных поверхностей [33 – 36].

Хроматографический анализ. Одним из распространённых способов определения химического состава газовой изоляции в оборудовании является проведение хроматографического анализа. Из оборудования берётся проба газа и помещается в газовый хроматограф. Результатом анализа является хроматограмма (рисунок 1.8), которая представляет собой временную последовательность пиков, соответствующих компонентам пробы. Высота или площадь пика пропорциональна количеству компонентов содержащихся в пробе [3].

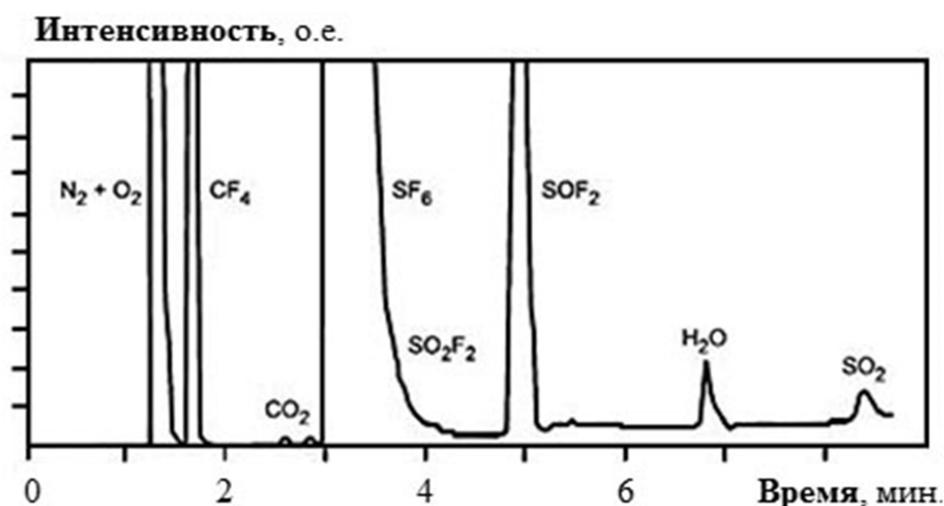


Рисунок 1.8 – Газовая хроматограмма при разложении элегаза [9]

ИК-спектроскопия. Другим методом физического анализа состава элегаза является инфракрасная спектроскопия тонкого разрешения (рисунок 1.9).

Луч инфракрасного света, пропущенный через газ, взятый для пробы, в направлении светочувствительного детектора, ослабляется по уровню. Отношение проходящего светового потока к падающему, как функция длины волны, формирует инфракрасный спектр поглощения отобранной пробы. Полученный спектр (рисунок 1.9) содержит пики поглощения на длине волны, характерной для данного вида газа. Размер, форма и расположение пиков спектра используются для идентификации состава и количества примесей в пробе.

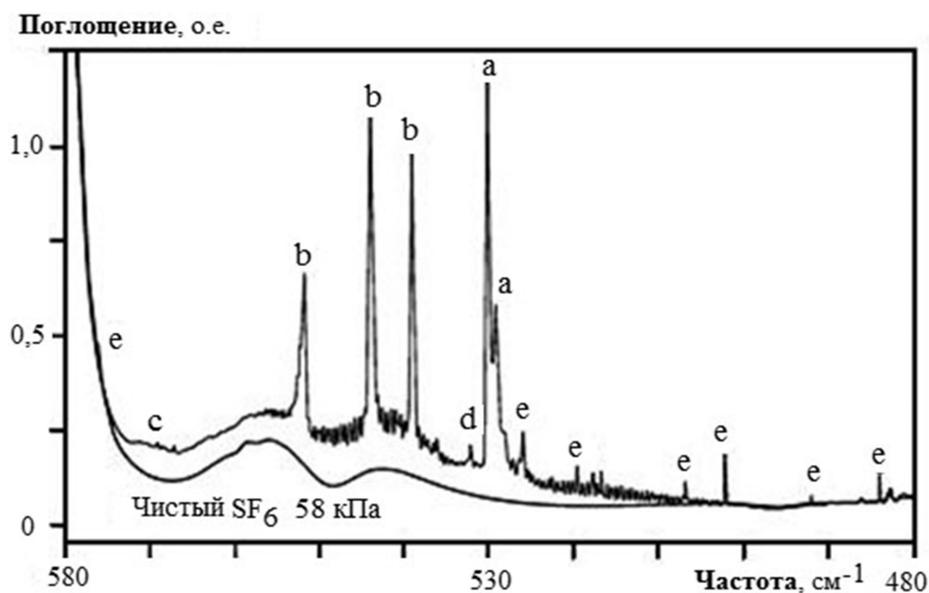


Рисунок 1.9 – Инфракрасная область спектра загрязнений элегаза:

a – SOF_2 ; b – SO_2F_2 ; c – SOF_4 ; d – SF_4 ; e – H_2O

Измерение влажности. Влажность элегаза, не содержащего продукты разложения, определяется посредством измерения точки росы на приборе, изготовленном в соответствии с требованиями нормативных документов [9, 28]. Точка росы определяется как температура, при которой начинается конденсация, и рассчитывается как среднее между значением температуры, достигнутым в результате переохлаждения после прекращения добавления хладагента при первых признаках конденсата на зеркале, и значением температуры после полного исчезновения влаги при согревании. Погрешность определения лежит в пределах 1°C .

Влажность загрязнённого продуктами разложения элегаза может быть определена специальными газоанализаторами (мультианализаторами). Например, приборы фирмы «DILLO» могут измерять концентрацию элегаза (0 – 100) %, точку росы (влажность) (от -60 до $+20$) $^\circ\text{C}$, концентрацию диоксида серы (0 – 20) ppm и фтористого водорода HF (0 – 10) ppm [21].

Измерение кислотности. Все образующиеся в разрядах продукты разложения шестифтористой серы при взаимодействии с водой, образуют кислоты. Таким образом, степень загрязнённости элегаза продуктами разложения может быть оценена посредством измерения его кислотности. Кислотность элегаза определя-

ется кислотно-щелочным титрованием. Выделяют два способа определения кислотности элегаза: мокрый способ описан в стандартах [9, 28] и сухой, когда титрование производится с помощью сухих реактивов [3].

Мокрый способ основан на взаимодействии содержащихся в элегазе кислотообразующих примесей со стандартным раствором щелочи и последующим титрованием избытка щелочи стандартным раствором кислоты. Прибор включает в себя три стеклянных барботера, заполненные окрашенным раствором щелочи, обеспечивающие полное извлечение кислотных примесей из контролируемого объема элегаза пропускаемого через них. Далее щелочной раствор из барботеров (по отдельности) переносят в химический стакан и титруют раствором H_2SO_4 до обесцвечивания индикатора. Кислотность элегаза, выраженная в миллионных массовых долях фтористоводородной кислоты, рассчитывается по формуле:

$$[HF] = \frac{20 \cdot 10^6 \cdot НК \cdot [(B-x) + (B-y) + (B-z)]}{6,16 \cdot 10^3 \cdot V_c}, \quad (1.1)$$

где B — объем раствора серной кислоты, израсходованной на титрование контрольного раствора, мл; x, y, z — объемы раствора серной кислоты, израсходованной на титрование отбарботированных растворов соответственно в первом, втором и третьем барботере, мл; 20 — грамм-эквивалентная масса фтористого водорода; $Н$ — нормальность раствора серной кислоты; K — поправка к титру раствора серной кислоты; V_c — объем пропущенного элегаза, приведённый к температуре 20 °С и давлению 760 мм рт. ст., л.

Сухой способ для оперативного определения кислотности основан на титровании с помощью сухих реактивов. Титрование кислотных примесей происходит на сухом адсорбенте, окрашенном бромкрезоловым индикатором. Кислотность в миллионных массовых долях эквивалентов HF (ppm-масс.) определяется как отношение длины обесцветившегося участка к объему пропущенного газа

$$[HF] = \frac{kL}{V}, \quad (1.2)$$

где k — коэффициент, определяемый калибровкой; L — длина обесцветившегося участка, см; V — объем пропущенного газа, л.

1.4 Переходные процессы и высокочастотные перенапряжения в КРУЭ

Изложенная информация необходима для лучшего представления об особенностях распространения сигналов ЧР и для оценки подбросов потенциала на оболочке КРУЭ. Такая оценка нужна для определения требований по электромагнитной совместимости к датчикам, закреплённым на оболочке и других близких частях. Главная особенность КРУЭ, влияющая на переходные процессы, состоит в том, что токоведущие электроды образуют с оболочкой практически коаксиальную конструкцию с малым волновым сопротивлением и большой добротностью. Как следствие, коммутационные процессы возбуждают высокочастотные перенапряжения и токи. В первых КРУЭ наблюдались броски напряжения на заземлённых оболочках до нескольких киловольт и даже на расстоянии в десятки и сотни метров, т.е. на контурах заземления. Такие переходные напряжения на «заземлении» оболочки возникают и при пробое в элегазе SF₆, при внутренних повторных пробоях в выключателе, при коммутациях разъединителем или при перекрытии внешней изоляции близкого к ГИС оборудования, например, при перекрытии ввода «воздух-элегаз».

Переходные напряжения на оболочке (Transient Enclosure Voltage, TEV) могут создать большие проблемы для электромагнитной совместимости технических средств и безопасности персонала. Внутренние броски напряжения производят волны, бегущие в обоих направлениях от точки пробоя. Такие переходные процессы часто называют высокочастотными перенапряжениями ВЧП. Из-за высокой частоты в переходных процессах, токи ограничены "скин-эффектом" в коаксиальных проводниках.

В точках изменения волнового сопротивления волны ВЧП испытывают отражения и преломления. Такие переходы могут быть смоделированы как стыки длинных линий. Типичными точками перепада импеданса являются вводы «воздух – элегаз», вводы «кабель – элегаз», заземляющие проводники, соединяющие оболочку КРУЭ с заземляющей сеткой, и ОПН. Герметичные опорные изоляторы (spacer) также могут вызывать отражения.

Пробой в КРУЭ происходит за время, которое зависит от давления элегаза

$$T_{r \min} \cong \frac{1 \dots 1,5}{p} \text{нс}, \quad (1.3)$$

где давление, p , выражено в МПа.

Исследования с помощью программы ЕМТР показывают, что при повторных пробоях дугогасительной камеры кратность перенапряжений в трансформаторе на холостом ходу могут достигать 3 о.е., а кратность перенапряжения при отключении выключателя может составить (1,5 – 2) о.е. Две волны, бегущие в противоположных направлениях, имеют амплитуды по 50% от указанных кратностей.

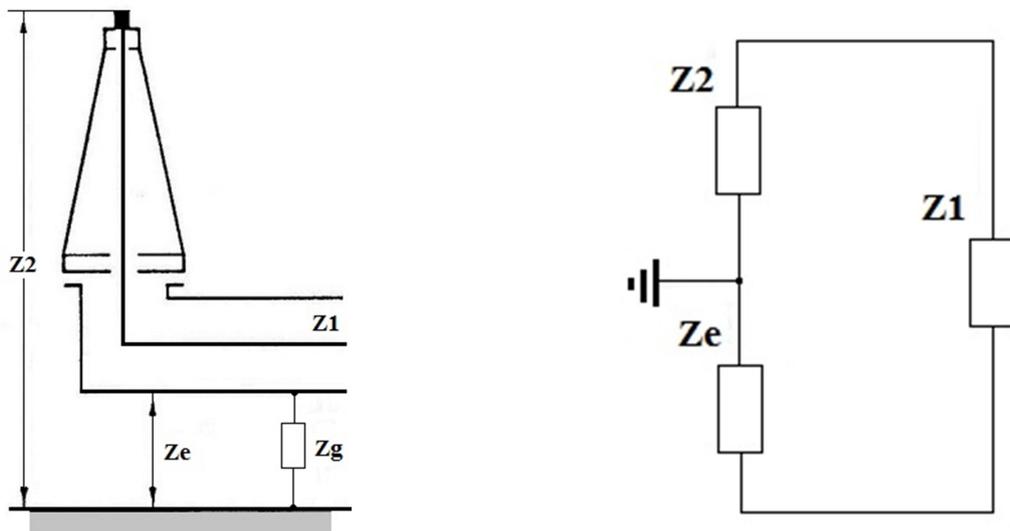


Рисунок 1.10 – К оценке волны, распространяющейся за пределы КРУЭ

На ввод при переходных процессах попадает волна, S_1 (рисунок 1.10)

$$S_1 = -\frac{2Z_e}{Z_1 + Z_2 + Z_e}, \quad (1.4)$$

где Z_1 и Z_2 – волновые сопротивления ввода и КРУЭ относительно земли и оболочки; Z_e волновое сопротивление оболочки КРУЭ.

В переходном процессе на оболочке КРУЭ могут появиться большие напряжения (рисунок 1.11).

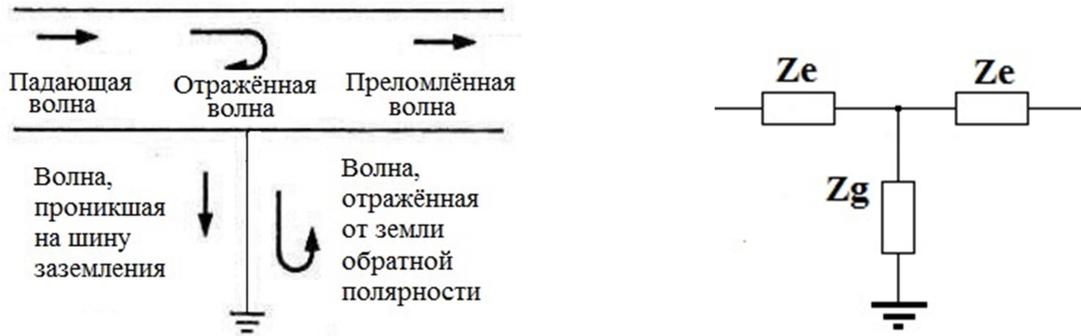


Рисунок 1.11 – К оценке переходного напряжения на оболочке КРУЭ

Эти напряжения могут значительно осложнить измерения выходных сигналов с датчиков давления, температуры и аппаратуры регистрирующей ЧР. Амплитуда волны, выходящей в линию, составляет S_2

$$S_2 = -\frac{2Z_g}{2Z_g + Z_e}, \quad (1.5)$$

где Z_g и Z_e волновые сопротивления заземлителя и оболочки КРУЭ.

Типичные значения волновых сопротивлений составляют $Z_1 = 60 - 450$ Ом, $Z_2 = 350 - 260$ Ом, $Z_e = 200 - 90$ Ом, $Z_g = 150 - 300$ Ом (границы диапазонов изменения сопротивлений скоррелированы). Соответственно, расчётные величины коэффициентов преломления: $S_1 = 0,54 - 0,78$ и $S_2 = 0,54 - 0,75$.

Схожая ситуация имеет место и на экране кабельного ввода (рисунок 1.12).

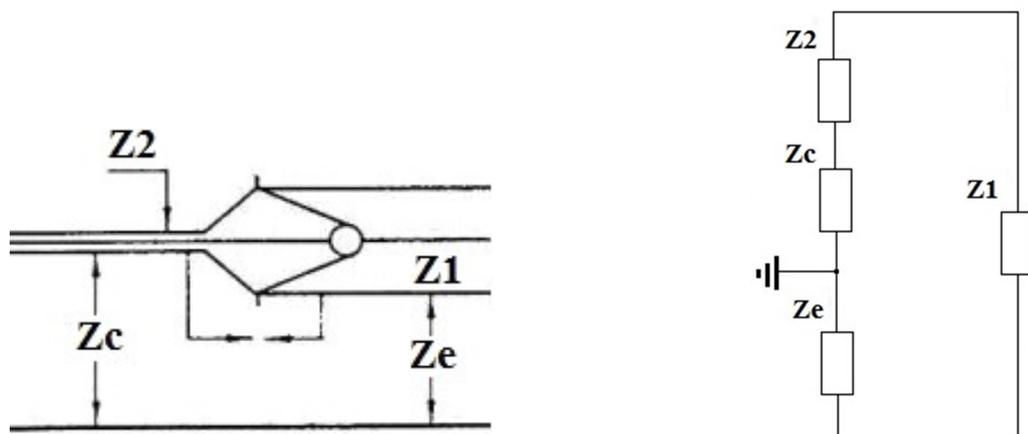


Рисунок 1.12 – К расчёту напряжения на оболочке КРУЭ

с кабельными вводами

1.5 Загрязнение КРУЭ частицами

Загрязнение объёма КРУЭ проводящими частицами считается одним из видов дефектного состояния, поскольку приводит к появлению микроразрядов, старению изоляционных материалов и даже снижению электрической прочности. Основными причинами загрязнения частицами являются плохая обработка поверхностей, трение сильфонов в компенсаторных муфтах, плохая механическая сборка и другие дефекты металлических деталей [37, 38].

Влияние частиц проявляется в инициировании ЧР в процессе перезарядки частиц при столкновениях с электродами и в снижении электрической прочности. Степень и опасность влияния зависят от размеров частиц (рисунок 1.13), неравномерности распределения напряжённости электрического поля, состава газа (наличия примесей), деформации частиц, количества свободных частиц, продолжительности воздействия и формы кривой напряжения, близости к опорному изолятору, кинематического состояния (неподвижные или свободные частицы) и др.

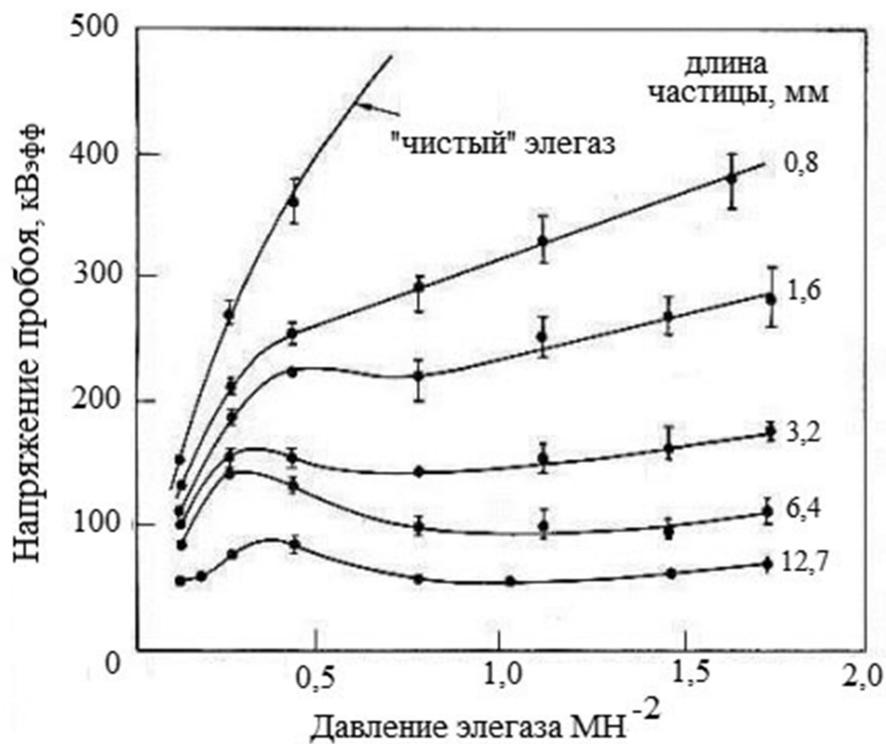


Рисунок 1.13 – Снижение электрической прочности элегаза в коаксиальной системе электродов при наличии частицы в виде кусочка проволоки

Снижение количества частиц в процессе изготовления и сборки КРУЭ достигается тщательной обработкой токоведущей цепи и оболочки. Считается, что реально очищается до 85% площади внутренней поверхности электродов. Оболочки обычно изготавливают из литых алюминиевых или железных труб с шероховатостью поверхности от 65 до 125 мкм. Любой процесс подготовки поверхности направлен на ликвидацию оксидных плёнок, недоступных для обработки зон, выступов и заусенцев, недообработанных машиной частей. Для очистки применяют химическое травление, песко- или стеклоструйку, абразивную обработку с использованием бумаги с окисленным маслом, механическую вибрацию с принудительной циркуляцией воздуха и ультразвуковую обработку.

Одним из кардинальных решений является введение в конструкцию так называемых ловушек частиц. Их действие основано на формировании направленного «электрического ветра», загоняющего заряженные частицы в безопасный замкнутый объём. Ловушки применяются преимущественно в газоизолированных линиях из-за большой площади протяжённых электродных систем и объёма [7]. В конструкциях КРУЭ прочно прижились диэлектрические покрытия и предварительное кондиционирование на напряжении постоянного тока [37].

Различают частицы по месту расположения и состоянию: неподвижные на фазном проводе; неподвижные на оболочке; свободно движущиеся в электрическом поле; прилипшие (вкрапленные) к опорным изоляторам.

Даже при наличии диэлектрических покрытий, применяющихся в новых конструкциях КРУЭ, металлическая частица может приобрести заряд вследствие проводимости слоя покрытия (рисунок 1.14,а), от микрозарядов между частицей и покрытием (рисунок 1.14,б) или при контакте с уже заряженной поверхностью.

Тем не менее, диэлектрические покрытия оказывают влияние на зарядку частиц, максимальную высоту дрейфа при переменном напряжении, вызывают "торможение" движения частиц и создают режим квазирезонанса. В конечном итоге, они влияют на электрическую прочность изоляционного промежутка, что было подтверждено экспериментально [37].



Рисунок 1.14 – Зарядка частицы через диэлектрическое покрытие (а)
и от частичного разряда между частицей и покрытием (б)

1.6 Опорные изоляторы

Опорные изоляторы предназначены для крепления главных токоведущих частей (токопроводов) на определённой дистанции от заземлённой оболочки и друг от друга в случае трёхфазного конструктивного исполнения КРУЭ переменного тока. Их типичные конструкции приведены на рисунке 1.15.

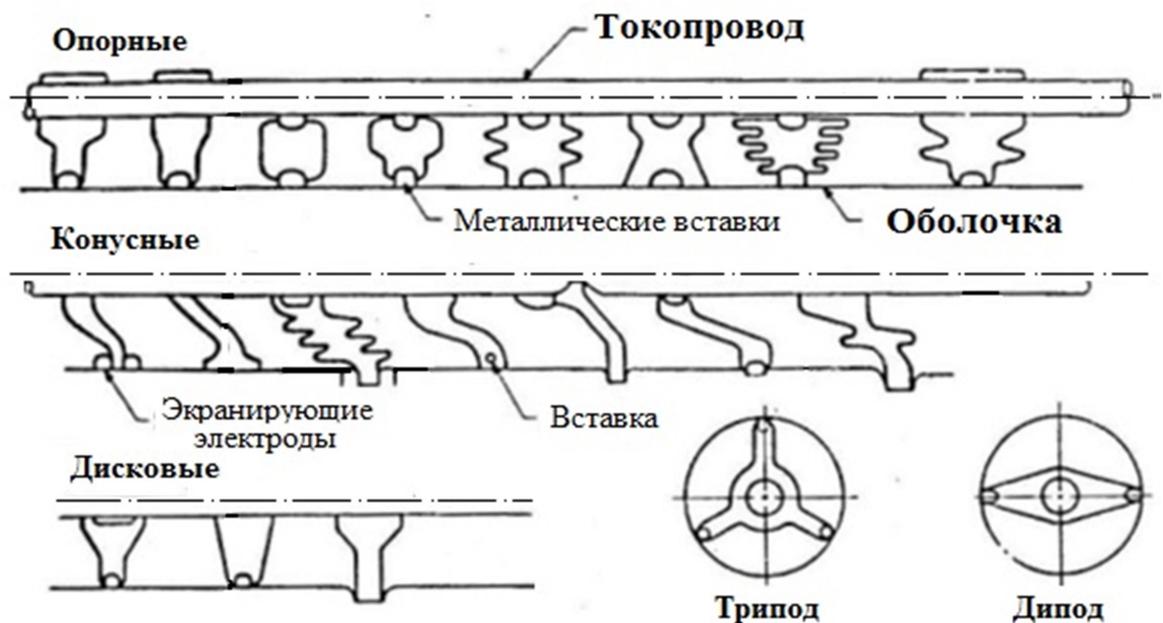


Рисунок 1.15 – конструкции опорных изоляторов

Основным требованием к изоляторам является минимальное, а в идеале, - нулевое влияние на электрическую прочность изоляционного промежутка. Попытки сделать это концентрируются вокруг регулирования электрического поля вдоль поверхности изолятора, особенно вблизи мест крепления изоляторов к оболочке и к токоведущей части. С этой целью многие конструкции предусматривают металлические вкладыши в тело изолятора. Заземлённые вставки экранируют место контакта изолятора с оболочкой с повышенной напряжённостью. Увы, и это мероприятие не всегда помогает.

Но особенно значительным бывает влияние неплотного прилегания тела изолятора к потенциальному электроду на интенсивность ЧР и на прочность всего изоляционного промежутка (рисунок 1.16).

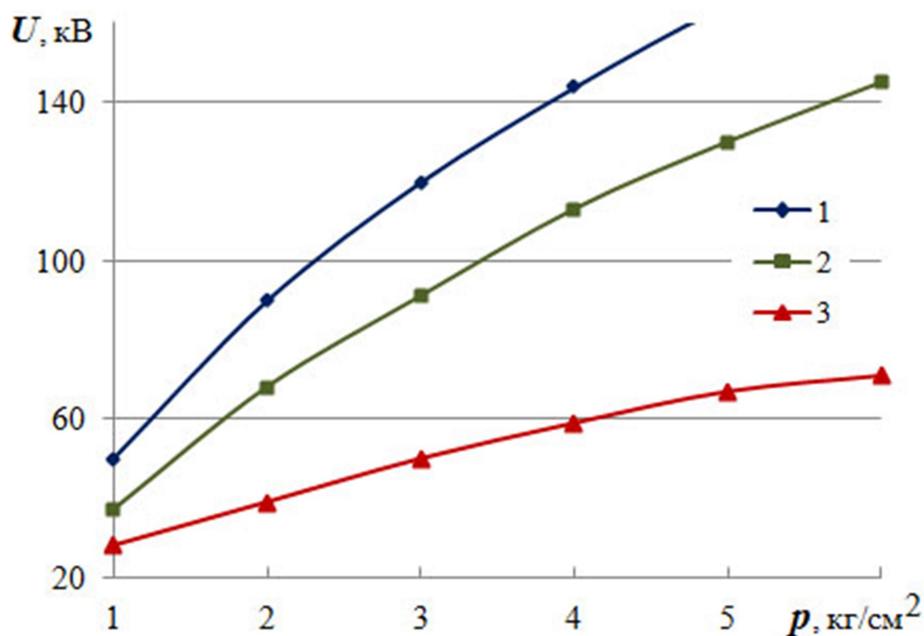


Рисунок 1.16 – зависимость электрической прочности от давления элегаза:
 1 – напряжение пробоя чистого промежутка; 2,3 – напряжение перекрытия по поверхности опорного изолятора, нормально смонтированного (2) и с видимым зазором относительно токоведущей части (3)

Наиболее трудными для конструирования считаются следующие проблемы:

~ триподная конструкция;

- ~ согласованность распределения тангенциальной и нормальной составляющих напряжённости электрического поля в диэлектрике;
- ~ предотвращение поверхностных частичных разрядов;
- ~ нейтрализация влияния прилипших к поверхности металлических частиц (рисунок 1.17);
- ~ строгий контроль наличия внутренних полостей и других дефектов;
- ~ для КРУЭ постоянного напряжения – накопление объёмного заряда в теле изолятора.



Рисунок 1.17 – Внешний вид опорного изолятора в КРУЭ 330 кВ

Надёжность опорных изоляторов такова, что серьёзные аварии из-за их отказа редки, но пустоты, выступы и проводящие загрязняющие вещества могут вызвать устойчивые разряды в объёме и привести к отказу. К сожалению, уровень ЧР, порождаемых этими дефектами, ниже порога обнаружения в 1 пКл.

Основным материалом для изготовления изоляторов являются эпоксидные смолы различного состава связующих и наполнителей. Литьё является технологическим высокотемпературным процессом изготовления изоляторов, а неравномерность охлаждения и загрязняющие вещества в наполнителе (Al_2O_3) должны быть сведены к минимуму путем строгого контроля качества. В этой связи большие надежды связаны с внедрением в качестве наполнителей нанопорошков [39,

40]. Электрическая прочность компаундных композиций превышает 1 МВ / см, но материал стареет, особенно быстро при воздействии ЧР. В ранних конструкциях рабочие напряжённости поля переменного тока составляли 10 кВ_{эфф} / мм в местах усиления поля. Многие из этих изоляторов вышли из строя в течение 5 лет. Типичные напряжённости в настоящее время находятся в диапазоне от 2 кВ / мм в КРУЭ 145 кВ до 4,1 кВ / мм в КРУЭ 800 кВ. Но некоторые конструкции высокого напряжения до сих пор работают при рабочей напряжённости (5 – 6) кВ/мм.

Экономические соображения заставляют снижать размеры изоляторов, насколько это позволяет делать диаметр оболочки. Металлические выступы и загрязняющие вещества проявляют «молчаливую» фазу зарождения начала повреждения. Обнаружение ЧР требует увеличения чувствительности, так как размер изоляторов увеличивается с уровнем напряжения. Например, изолятор в КРУЭ 500 кВ, надо испытывать с чувствительностью обнаружения около 0,5 пКл. Такой уровень чувствительности трудно достичь даже на заводе-изготовителе.

Предполагается, что совершенствование ультраширокополосных датчиков ЧР снизит порог обнаружения ЧР до 0,1 пКл, а при дальнейшем улучшении фильтрации помех и качества испытательных трансформаторов в заводских испытаниях могут быть достигнуты уровни чувствительности в 0,01 пКл.

Другим отрицательным для надёжности фактором является снижение запаса между прочностью изоляции и рабочим напряжением, которое имеет место с ростом класса напряжения. Даже при наличии пустот, которые присутствуют или возникают из-за усиления напряжённости электрического поля на выступах и на металлических включениях, испытания затрудняются тем, что скорость производства электронов является слишком малой, чтобы возникли ЧР в течение одной минуты испытаний (3 электрон/см³·сек). Кроме того, порог обнаружения ЧР сильно зависит от радиального положения полости.

Испытания изоляторов на заводе при более высоком напряжении будет компенсировать отсутствие «начальных» электронов. Вопрос о применении рентгеновского облучения во время испытаний изоляторов теперь серьезно рассматри-

вается производителями. Инициирование ЧР рентгеновским излучением – это новый метод для улучшения качества дефектоскопии изоляторов [41 – 43].

Не следует игнорировать и вопрос о накопленном в объёме или осевшем на поверхности заряде и его последующем влиянии на напряжение перекрытия. Осевший заряд может быть особенно опасным при работе разъединителя. Суммарное поле, созданное напряжением переходного процесса и потенциалом заряда, может быть достаточным, чтобы вызвать перекрытие изолятора.

В заключение этого параграфа напомним, что изолирующие вставки широко используются в аппаратах высокого напряжения. С точки зрения выдерживаемого напряжения они являются самыми слабыми компонентами, и улучшение понимания механизма перекрытия по поверхности изоляции является полезным для улучшения конструкции аппарата.

1.7 Частичные разряды в КРУЭ

Тематике частичных разрядов в изоляционных конструкциях посвящено огромное количество публикаций. В библиографическом списке к данной работе приведена лишь малая часть публикаций по ЧР в элегазе, в КРУЭ и его компонентах. Большая часть информации была заимствована из монографии [5], докладов на сессиях СИГРЭ и симпозиумах по технике высоких напряжений (ISH), из статей из американских журналов «IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation», «IEEE Transactions on Power Delivery» и отечественных источников.

Условно выбранные публикации можно разделить на несколько тематических групп:

- ~ исследования физического механизма ЧР [44 – 52];
- ~ разработка методик испытаний КРУЭ с регистрацией интенсивности ЧР: приёмодаточных испытаний на заводе и на месте установки [53 – 60];
- ~ исследования ультравысокочастотных (УВЧ) сигналов ЧР, их генерации, распространения, затухания и методов регистрации [61 – 69];
- ~ синхронная регистрация УВЧ и/или электрических и акустических сигналов ЧР [70 – 83];

- ~ системы мониторинга состояния КРУЭ [84 – 88];
- ~ распознавание вида дефекта по характеристикам ЧР [85 – 94].

Кроме указанных, дополнительную информацию о публикациях по всем вопросам, касающимся КРУЭ, можно найти в библиографии [95, 96].

Основные понятия о механизме частичных разрядов. Под ЧР понимают локализованный электрический разряд внутри изоляционной среды, расположенной между двумя электродами. В соответствии с формулировкой к ЧР можно отнести различные типы разрядов, такие как корона, лавина электронов, многолавиновые (Таунсендовские) разряды, стримеры, барьерные разряды и микроразряды при ударах заряженных частиц. ЧР – очень сложное явление, имеющее хаотический, нестационарный или фрактальный тип поведения с непредсказуемыми переходами между разными физическими механизмами. Путаница в классификации механизмов ЧР является следствием разнообразия геометрических, физических и химических факторов, влияющих на ЧР.

В большинстве рассматриваемых случаев ЧР является газовым разрядом в полостях твердого диэлектрика. Вид диэлектрика может влиять на поведение ЧР, за счет образования вторичных электронов или изменения локального поля из-за накопления поверхностного или объемного заряда. Принципиально процесс ЧР может быть описан системой дифференциальных уравнений. С их помощью можно рассчитать ток, i , отношение напряжённости электрического поля к плотности газа, E/N , коэффициенты ударной ионизации, прилипания, вторичной эмиссии, α, η, β и др. Все типы «холодных» разрядов, такие как корона или таунсендовский разряд, удовлетворяют одному набору уравнений. Тип разряда будет зависеть от принятых начальных условий (состав газов, давление, поверхностная проводимость диэлектрика), и от граничных условий (геометрия электродов, толщина диэлектрика, приложенное напряжение). В общем случае, модель ЧР должна включать в себя как физические (рисунок 1.18), так и химические процессы (рисунок 1.19), связанные с изменениями свойств среды и диэлектрика в месте возникнове-

ния ЧР и приводящие к изменению в поведении самих ЧР, делает их нестабильными [44 – 47].

Некоторые исследователи утверждают существование формы ЧР в виде тлеющего разряда [48 – 52]. Согласно классическим представлениям тлеющий разряд – устойчивый разряд, для которого пространственные и временные характеристики в значительной степени обусловлены равновесным распределением плотности пространственного заряда ионов и электронов.

В тлеющем разряде ток является постоянным или изменяется очень медленно с течением времени, что трудно представить при ограничении зоны разряда диэлектриком с весьма малой проводимостью. Наиболее вероятное объяснение квазистационарности [48, 49] или «молчаливости» [51] ЧР в этих случаях следует искать в методиках регистрации, например, в недостаточной разрешающей способности по времени и др.

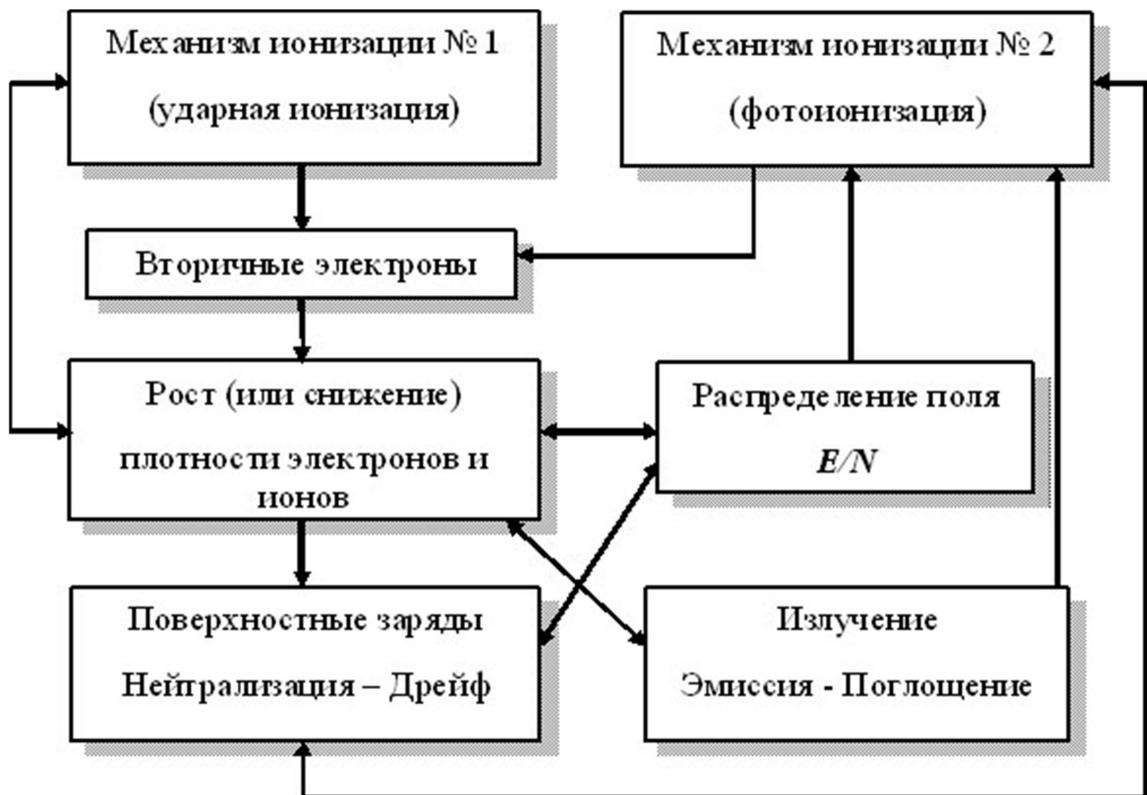


Рисунок 1.18 – Физические процессы формирования частичного разряда

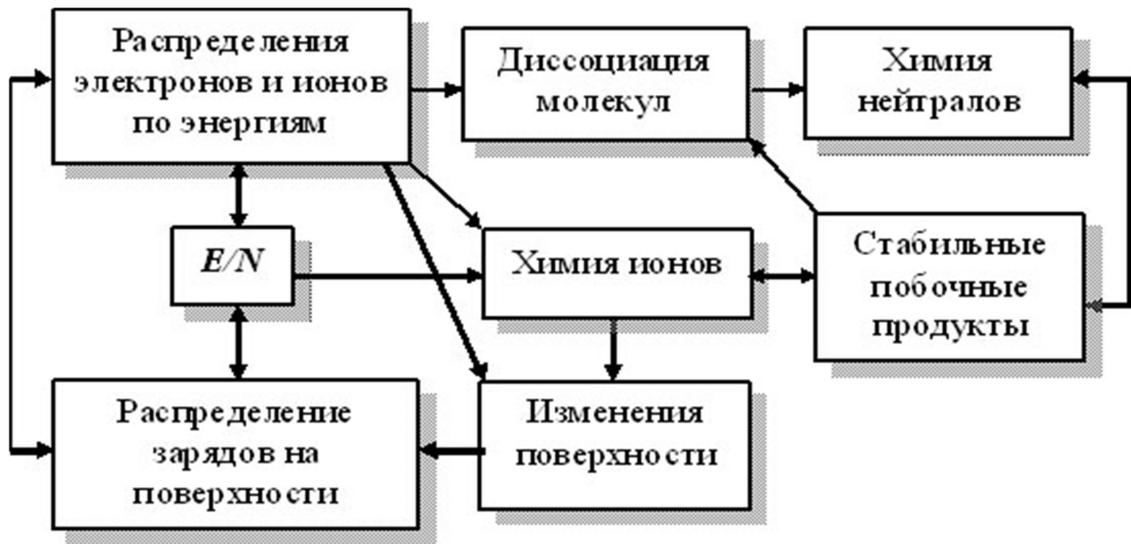


Рисунок 1.19 – Длительные физико-химические процессы воздействия частичных разрядов

К особому виду ЧР, свойственному только для газоизолированных систем и в их числе КРУЭ следует отнести микроразряды, возникающие при перезарядке свободных металлических частиц. Перемещаясь внутри КРУЭ под действием сил электрического поля, частицы испытывают соударения с внешним заземлённым кожухом, с токопроводами высокого напряжения или с изоляционными конструкциями. Соударения частиц сопровождаются током их разрядки (перезарядки) и электромагнитным излучением (ЭМИ) высокочастотного диапазона. Весьма похожее излучение вызывает и ток ЧР. При небольшой концентрации частицы загрязнения не представляют непосредственной угрозы для эксплуатации КРУЭ, но в процессе неизбежной зарядки и разрядки частиц происходит образование продуктов разложения элегаза, постепенно накапливающиеся в объёме и меняющие свойства элегаза. Помимо этого в результате соударения частиц с опорной изоляцией на ней могут возникать микросколы или частица может прилипнуть к изоляционной конструкции, в результате чего на изоляции образуются локальные очаги ЧР, которые приводят к её деградации, как видно, например, на рисунке 1.17.

Регистрация ЧР стала обязательным элементом контроля качества элементов КРУЭ на заводах-изготовителях, и контроля качества сборки КРУЭ в предпусковых испытаниях. В методиках заводских приёмосдаточных испытаний регистра-

цию интенсивности ЧР и напряжения производят преимущественно электрическим методом и в диапазоне частот 0,3 – 2 МГц, т.к. в испытательных лабораториях защиту от внешних помех выполнить относительно просто. Преимущество электрического метода состоит в непосредственном определении нормируемой величины – кажущегося заряда. На рисунках 1.20 и 1.21 приведены зависимости кажущегося заряда ЧР, возникающих на выступах токопровода и от частиц, прилипших к оболочке. На этих же рисунках отмечены области характерных напряжённостей вблизи токопровода и оболочки.

К сожалению, в выбранных источниках [53 – 60] умалчивается зависимость результата измерений кажущегося заряда от вида дефекта, размеров и места расположения. Вместе с тем, некоторыми исследователями учитывается запаздывание ЧР из-за проблемы «начального» электрона, с которого, собственно, и начинается образование первой лавины ЧР [41, 42]. Дело в том, что под действием естественного космического фона в одну секунду образуется 3-4 пары заряженных частиц в кубическом сантиметре газового объёма. При малых размерах полости образование в ней начального электрона только от действия внешнего фона проблематично в течение всего времени испытаний.

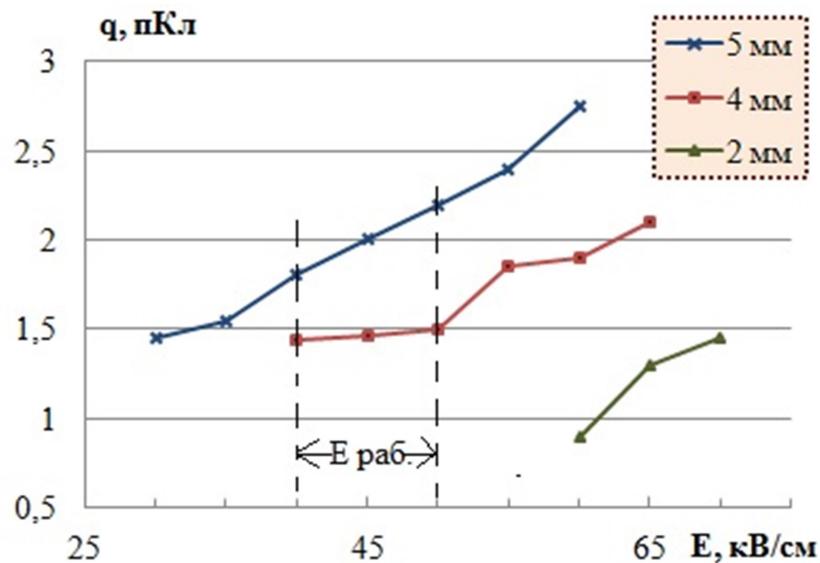


Рисунок 1.20 – Типичные величины кажущегося заряда частичных разрядов (вспышек короны) на выступах различной высоты на поверхности токопровода

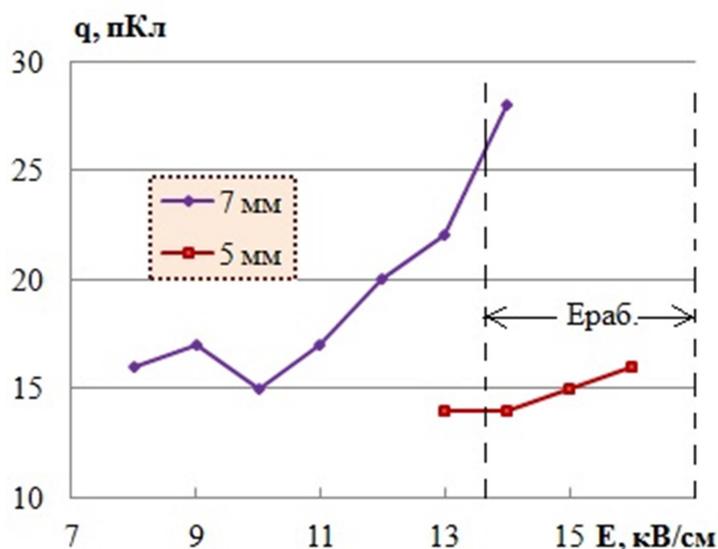


Рисунок 1.21 – Типичные величины кажущегося заряда вспышек короны на выступах различной высоты на внутренней поверхности оболочки

Выходом из этого положения может служить применение уже упоминавшейся рентгеновской «подсветки» или проведения первого пробного замера с перенапряжением и точного измерения при повторном подъёме напряжения. Разумеется, полезными действиями при испытаниях могут быть и операции по локации очагов ЧР, например, ультразвуковым методом, и распознавание вида дефекта и оценки степени его опасности, например, по амплитудно фазовым диаграммам.

Как показывает практика, интенсивность ЧР играет роль индикатора состояния изоляции КРУЭ и в процессе эксплуатации. Замечено, что за несколько дней до аварии интенсивность ЧР начинает быстро нарастать до (20 – 100) пКл [54]. Для регистрации ЧР в КРУЭ применяют акустический, электрический, электромагнитный и химический методы. Последний метод заключается в анализе проб элегаза, описанных в п.1.3. В соответствии с принципом действия этот метод нельзя признать чувствительным к начальным стадиям развития повреждений под действием ЧР. К электрическому методу мы ещё вернёмся, а сейчас разберёмся в возможностях акустического метода.

Акустическая регистрация ЧР. В результате ЧР образуется ударная волна, которая при распространении преобразуется в сверхзвуковую, а затем в звуковую волну (рисунок 1.22,а) и, в конечном счёте, в тепло.

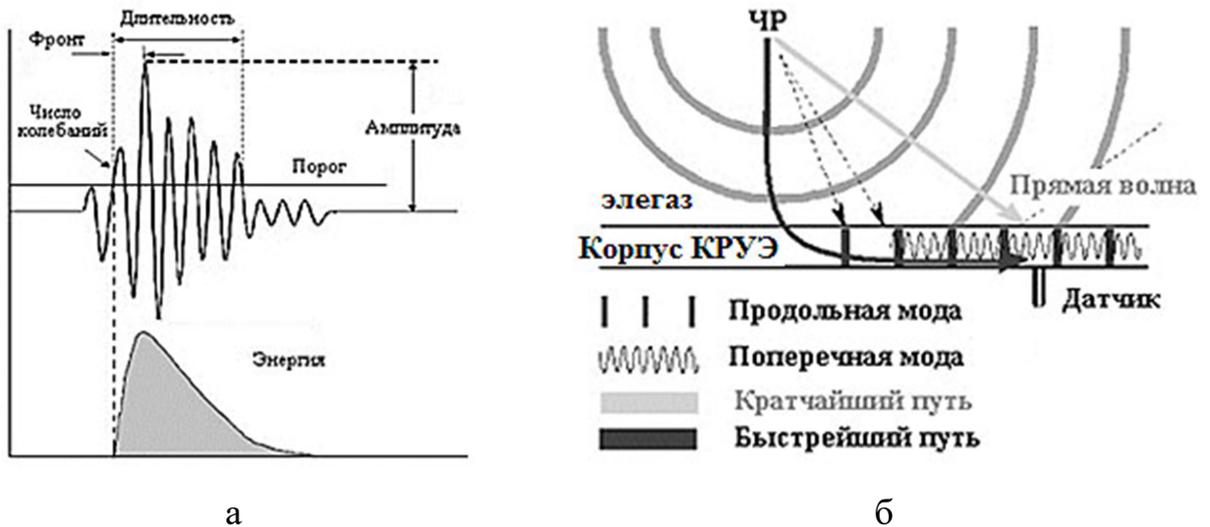


Рисунок 1.22– Характеристики (а) и пути распространения (б) акустических сигналов частичных разрядов

Звуковые волны имеют различные скорости в различных средах. Из-за этого самый короткий путь при акустическом распространении волны может быть не самым быстрым (рисунок 1.22,б). Типичные скорости акустической волны при температуре 20°C и атмосферном давлении составляют в воздухе 342 м/с, а в элегазе – 133 м/с. В твёрдых средах существуют два режима распространения (моды) акустической волны: продольная и поперечная. Типичные скорости акустической волны: в стали – $V_{\text{ст прод.}} \approx 5900$ м/с и $V_{\text{ст попер.}} \approx 3200$ м/с.

При распространении происходит затухание амплитуды колебаний. Для плоской волны давления оно оценивается коэффициентом затухания (дБ/м)

$$\alpha = \frac{1}{L} 20 \lg \left[\frac{p(0)}{p(L)} \right], \quad (1.6)$$

где L – расстояние, $p(0)$ – исходное давление.

Для газов и жидкостей коэффициент затухания

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho_0 v^3} \cdot \left(\frac{4}{3} \eta + \eta' + \frac{\gamma-1}{C_p} \chi \right), 1/\text{м} \quad (1.7)$$

где ρ_0 – плотность среды, кг/м^3 ; f – частота, Гц; η – динамическая вязкость ($\text{Па}\cdot\text{с}$); η' – коэффициент второй вязкости ($\text{Па}\cdot\text{с}$); v – скорость звука (м/с); χ – коэффициент теплопроводности ($\text{Вт / К}\cdot\text{м}$); C_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, ($\text{Дж/К}\cdot\text{г}$); γ – показатель адиабаты.

Типичные значения коэффициента ослабления составляют:

~ в элегазе $\alpha/f^2 \approx (8 - 10) 10^{-10} \text{ с}^2/\text{м}$ при 20°C и атмосферном давлении;

~ в стали $\alpha/f \approx 10^{-7} \text{ с/м}$ (для продольных волн).

В итоге на распространение акустической волны от источника ЧР до датчика сильно влияет геометрия и различие сред (элегаз, твёрдая изоляция, сталь) в объекте. Разные типы волн с различными скоростями распространения, отражения и преломления на границах сред, приводят к изменениям в распространении звука, его затухании, поглощению и рассеивании. Поэтому при акустической регистрации невозможно оценить кажущийся заряд и другие характеристики ЧР, и главная цель состоит в том, чтобы обнаружить ЧР и найти очаг их образования, т.е. произвести локацию ЧР. Для решения этих задач используют измерение интенсивности, времени распространения и частотного спектра акустических сигналов.

В качестве преобразователей применяют пьезоэлектрические датчики, акселерометры, микрофоны конденсаторного типа и др. На рисунке 1.23 приведены осциллограммы сигналов, измеренные синхронно с четырёх акустических датчиков. По временным интервалам между сигналами и скорости распространения звука можно вычислить точку рождения акустической волны, т.е. очага ЧР. Следует заметить, что исходные сигналы с акустических датчиков сильно зашумлены. Такими, как они изображены на рисунке 1.23, их получают после глубокой обработки с применением, например, вейвлет – анализа. На рисунке 1.24 приведены примеры вейвлет-анализа двух однотипных сигналов, один из которых осложнен шумами с мощностью на уровне мощности самого сигнала. Как следует из рисунка, вейвлет-анализ позволяет с высокой точностью построить контурную

масштабно-временную картину вейвлетных коэффициентов исходного сигнала даже при высоком уровне шумов.

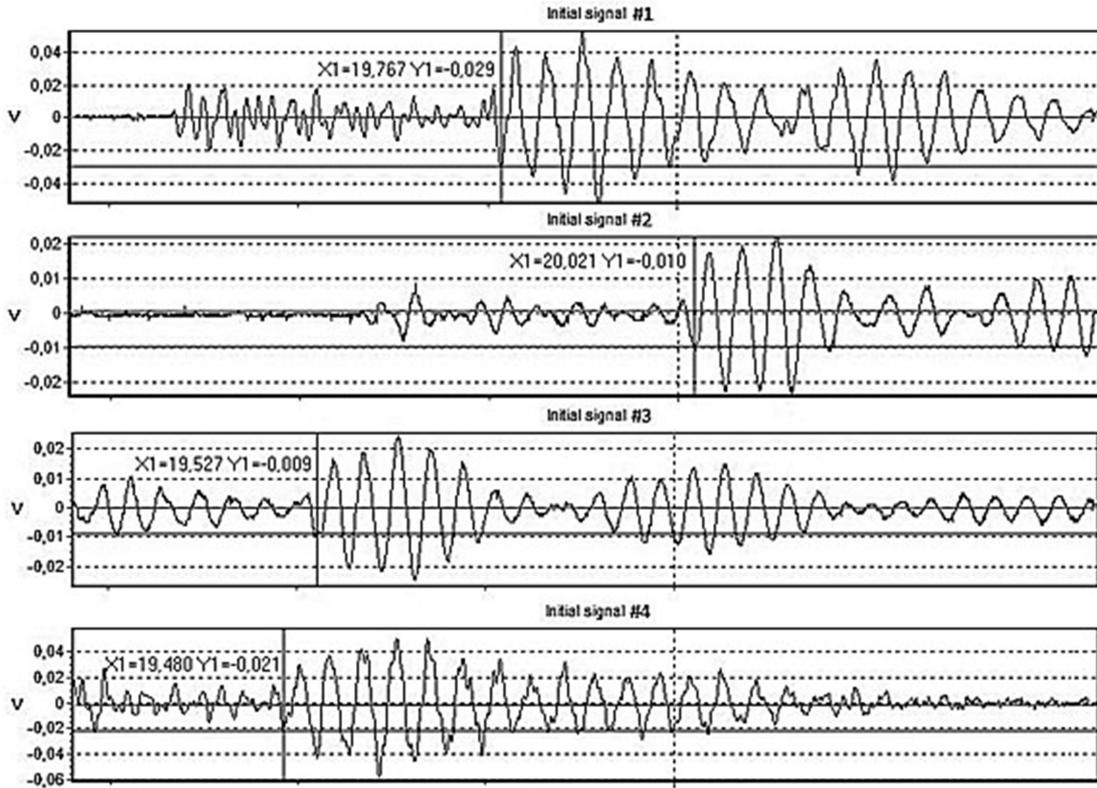


Рисунок 1.23 – акустические сигналы частичного разряда, синхронно зарегистрированные четырьмя датчиками

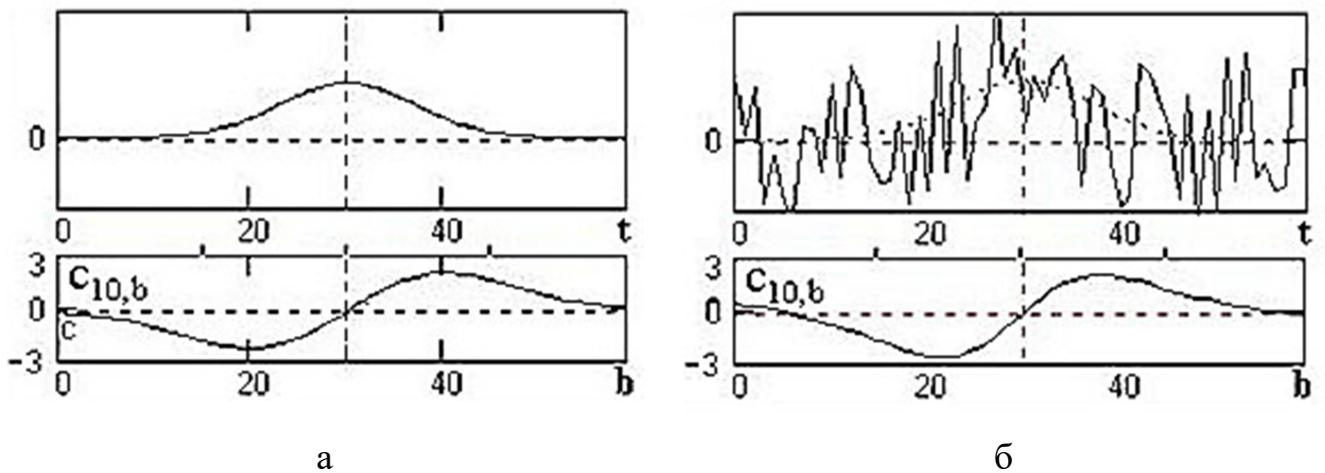


Рисунок 1.24 – Вейвлет-анализ обычного (а) и зашумлённого сигнала (б)

Электрический и электромагнитный методы регистрации ЧР. Задачу регистрации интенсивности и локации очага ЧР можно решать и обычными электрическими (Э) методами регистрации ЧР, используя характерные особенности амплитудно-фазовых диаграмм сигналов ЧР, и регистрацией электромагнитного излучения (ЭМ) частичных разрядов в диапазоне сверх- и ультравысоких частот. Однако совместное использование двух методов, указанных или в сочетании одного или обоих с акустическим (А) методом позволяют решать задачи легче и в более полном объёме. Схематично методика регистрации и локации ЧР приведена, например, на рисунке 1.25 [75].

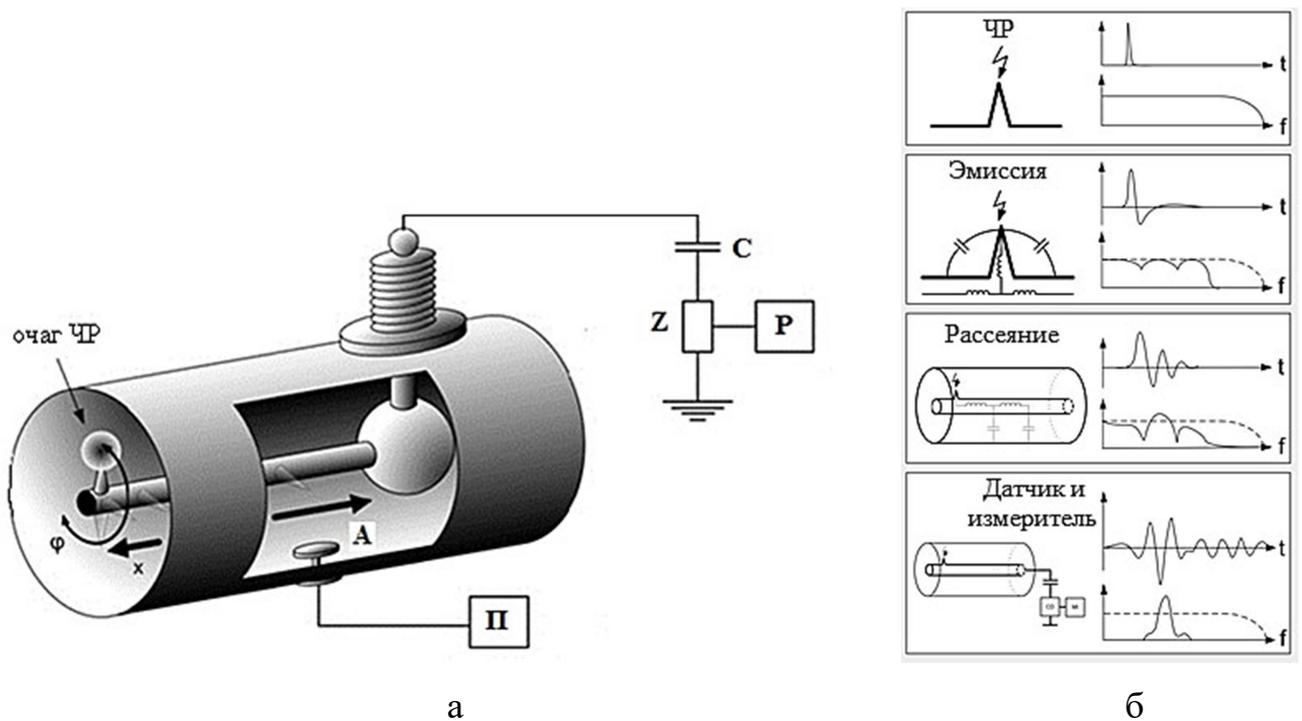


Рисунок 1.25 – Регистрация частичных разрядов в КРУЭ электрическим и электромагнитным ультравысокочастотным методами (а), а также характерные изменения в форме сигнала и в спектре частот (б)

На рисунке изображена часть ячейки КРУЭ в однополюсном исполнении и с вводом высокого напряжения «воздух – элегаз». ЧР моделируется короной, а очаг короны – выступом на шине высокого напряжения. От места возникновения разряда по шине течёт импульсный ток, и по всему объёму КРУЭ распространяется

электромагнитное излучение. Схема регистрации ЧР электрическим методом состоит из конденсатора связи C (в качестве конденсатора связи обычно используют ёмкость основной изоляции ввода), измерительного сопротивления Z и регистрирующей аппаратуры P .

В порядке отступления заметим, что проблема вводов типа «воздух – элегаз» имеет много общего с проблемой вводов высокого напряжения других типов. В частности, весьма непростая ситуация складывается при интерпретации результатов регистрации ЧР в изоляции конденсаторного типа. Этот вопрос и проблемы твёрдой изоляции вводов рассмотрены автором отдельно в главе 4.

Если присоединение КРУЭ к схеме осуществляется через кабельные вводы, то датчики электрических сигналов в виде высокочастотных трансформаторов тока включаются в цепи заземления оболочек кабелей. Локацию очага ЧР электрическим методом обычно осуществляют, используя затухание и временные задержки между сигналами от геометрически разнесённых датчиков. В КРУЭ затухание электрических сигналов очень мало. Невелико и время задержки сигналов, полученных от датчиков по концам КРУЭ (на рисунке второй датчик не показан), что, безусловно, ограничивает возможности метода. Кроме того, применение электрического метода регистрации ЧР в условиях эксплуатации сдерживается недостаточной устойчивостью к помехам, прежде всего, создаваемых короной на внешних присоединениях. В случае применения кабельных вводов дополнительно возникает проблема отделения сигналов ЧР, которые возникают в кабелях и их муфтах, от ЧР, которые возникают в объёме КРУЭ.

Электромагнитный метод регистрации представлен на схеме антенной A и приёмником $П$. Как правило, производители КРУЭ классов напряжения 220 кВ и выше, предусматривают не одну, а несколько встроенных антенн, которые используются затем в приёмодаточных испытаниях для оценки кажущегося заряда ЧР. Электромагнитному или УВЧ-методу отдаётся предпочтение как более помехоустойчивому по сравнению с электрическим методом. Однако в электромагнитном методе возникают трудности другого порядка. Одна из них состоит в том, что по своим характеристикам сигналы излучения от ЧР во внутренних дефектах

изоляции весьма схожи с сигналами от перезарядки частиц загрязнения. По этой причине задача определения вида дефекта, генерирующего ЭМИ, остаётся весьма сложной.

Для распространения волн излучения коаксиальную конструкцию КРУЭ можно рассматривать как волновод. От точки его возбуждения разрядным процессом внутри трубы в обе стороны распространяются излучение. Сложное электромагнитное поле, возбуждённое в волноводе, можно рассматривать как сумму бесконечного числа простых полей. Каждое из них характеризует определённый тип электромагнитных колебаний. Все поля можно разбить на три группы в зависимости от наличия или отсутствия аксиальных компонент поля:

~ волны типа ТЕМ (поперечно-электромагнитные волны) характеризуются отсутствием аксиальных составляющих поля ($E_z = 0, H_z = 0$);

~ волны типа Е или ТМ (поперечно-магнитные волны) характеризуются наличием аксиальной составляющей электрического поля E_z и отсутствием аксиальной магнитной составляющей, $H_z = 0$;

~ волны типа Н или ТЕ (поперечно-электрические волны) характеризуются отсутствием аксиальной составляющей электрического поля, $E_z = 0$.

Электрические сигналы ЧР распространяются в виде ТЕМ – волн, охватывающих диапазон частот от постоянного тока до очень высоких частот. При распространении по КРУЭ они испытывают искажения и затухание, что отражено графически на рисунках 1.26,а и 1.26,б.

Дополнительно к основной ТЕМ – волне, формируются моды более высокого порядка, ТЕ и ТМ. Они занимают диапазоны частот от двухсот мегагерц до полутора гигагерц и более в зависимости от классов напряжения КРУЭ.

Распространение волн электромагнитного поля описывается уравнением Максвелла. Электрическое поле $E(t)$ создаёт плотность тока $J(t)$ как сумму плотностей тока проводимости и тока смещения

$$\Delta \times H(t) = J(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{dD(t)}{dt}, \quad (1.8)$$

где σ_0 – объёмная электропроводность материала проводника.

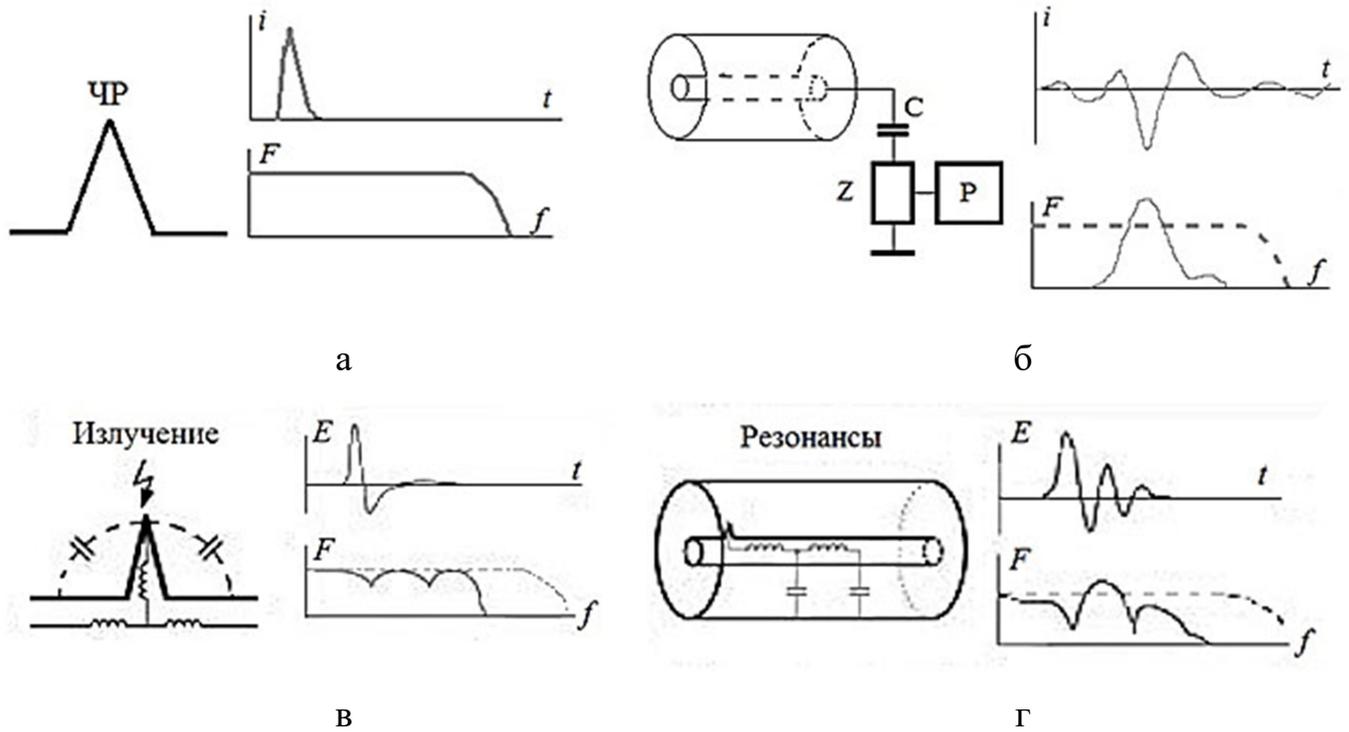


Рисунок 1.26 – Изменения в форме электрического сигналов
и в спектре частот излучения частичных разрядов

Излучающим элементом является канал ЧР (частица) и участок проводника вблизи него (неё). Поэтому свойства канала ЧР и его «окрестностей» влияют на излучаемый сигнал, а поперечные сечения компонентов H и E электромагнитного поля не имеют симметрии. В итоге передаточная функция зависит ещё и от угла φ (рисунок 1.25,а) между положением источника излучения по отношению к положению датчика.

Каждая волна испытывает отражения на неоднородностях, в результате чего возникают интерференционные наложения и стоячие волны (резонансы), имеет место затухание вследствие скин-эффекта и потерь в диэлектрических материалах. Поэтому сигнал, взятый с широкополосного УВЧ-датчика ЧР (встроенного в оболочку КРУЭ), является сложной суперпозицией всех мод излучения, с их резонансами и частотными спектрами (рисунок 1.27).

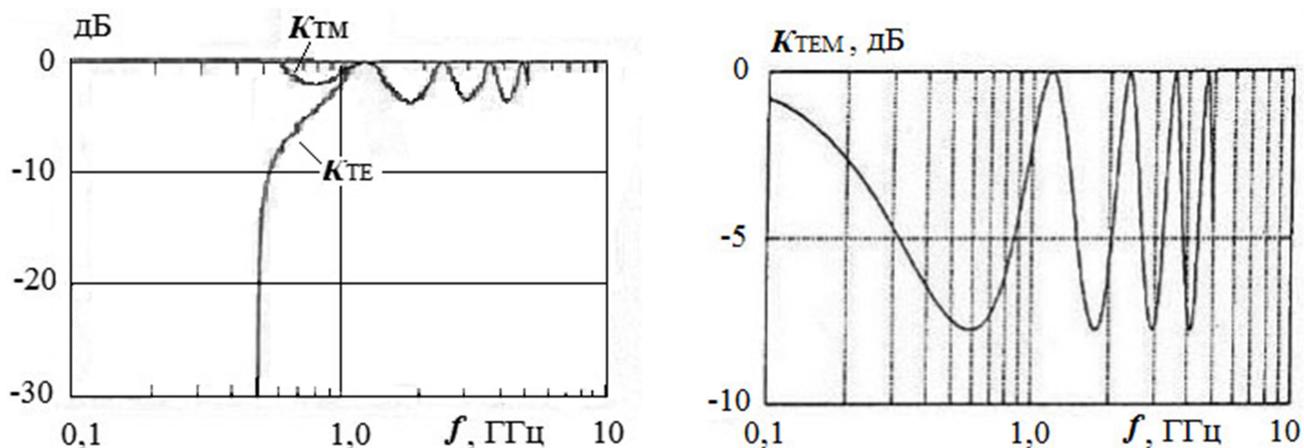


Рисунок 1.27 – Частотные характеристики для различных мод волн

Далее анализ усложняется, если рассматривать зависимость частоты от групповой скорости распространения волн. Все указанные явления приводят в итоге к очень сложному спектру сигналов, регистрируемых УВЧ-датчиками (рисунки 1.26,в и 1.26,г), которые чаще делаются в форме дисков.

На рисунке 1.28 приведен эскиз встроенного дискового электрода и его эквивалентная схема, отражающая изменения волновых сопротивлений в разных частях конструкции. Изменения волнового сопротивления влияют на форму сигнала электромагнитного излучения ЧР и частотный спектр, которые в упрощенном виде приведены на рисунке 1.29.

В [76] приведён достаточно сложный алгоритм диагностирования изоляции КРУЭ с помощью УВЧ регистрации ЧР и интерпретации результатов измерения, схематично показанный на рисунке 1.30.

В основе интерпретации измеряемых сигналов используется метод FDTD (Finite-Difference Time-Domain) или метод «конечных разностей во временной области». Тип ЧР и его заряд в определённой степени влияют на временные и амплитудные характеристики тока. Исходя из формы тока и размеров излучателя, рассчитываются характеристики исходного излучения.

Далее в расчётах учитываются свойства конструкции, влияющие на характеристики ЭМИ по мере его распространения от очага ЧР до приёмной антенны, а также амплитудно-частотные характеристики измерительного тракта.

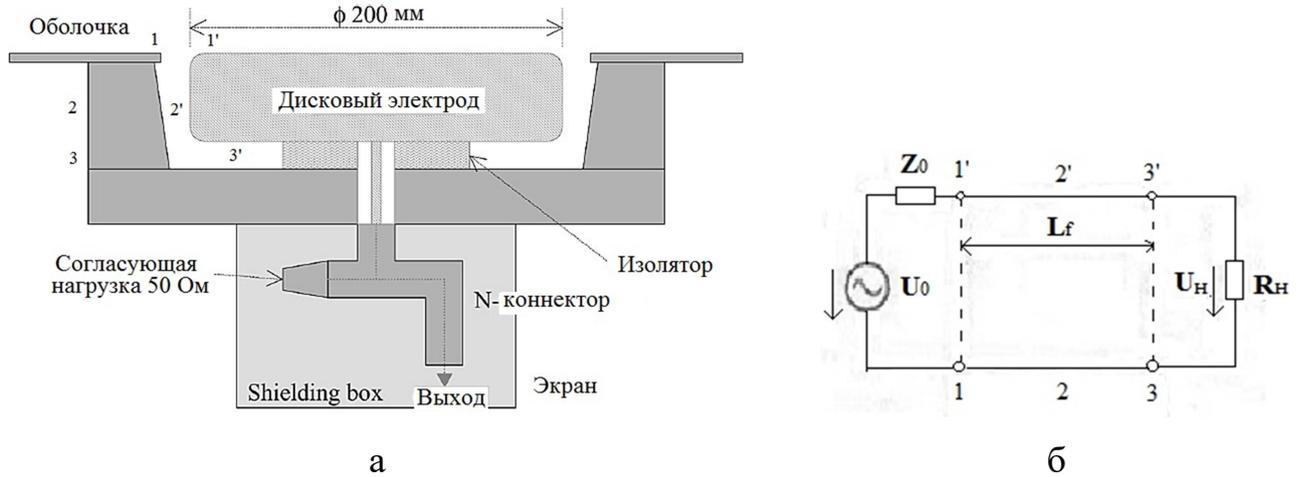


Рисунок 1.28 – Эскиз дискового электрода (а) и его эквивалентная схема (б)

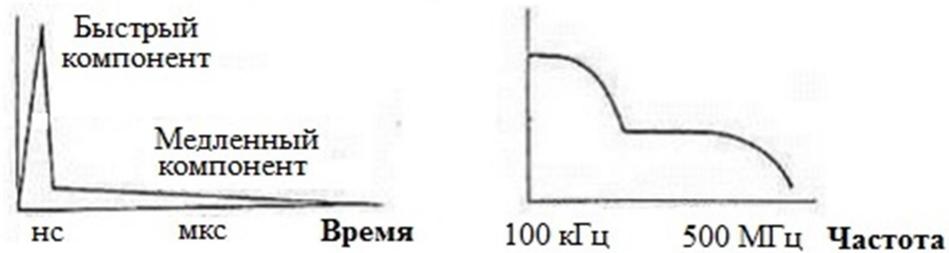


Рисунок 1.29 – Стилизованная форма сигнала частичного разряда, получаемого на дисковом датчике, и его частотный спектр

Характеристики сигнала ЭМИ в некоторых случаях помогают уточнить тип ЧР и место его расположения. Зависимости между характеристиками импульса тока и электромагнитного излучения относительно просто рассчитать в случае гауссовой формы тока ЧР. Чтобы добиться именно этой формы, авторы [77] провели исследования короны в промежутке «игла – плоскость» при вариации давления элегаза и степени неоднородности поля, регулируемой длиной иглы. При снижении давления до 1 Бар и укорачивании иглы до 14 мм импульс тока ЧР приобретал симметричную колоколообразную форму. При использовании такой конструкции имитатора ЧР исчезали эффекты отражения излучения от концов КРУЭ, что значительно упростило дальнейший анализ сигналов ЭМИ.

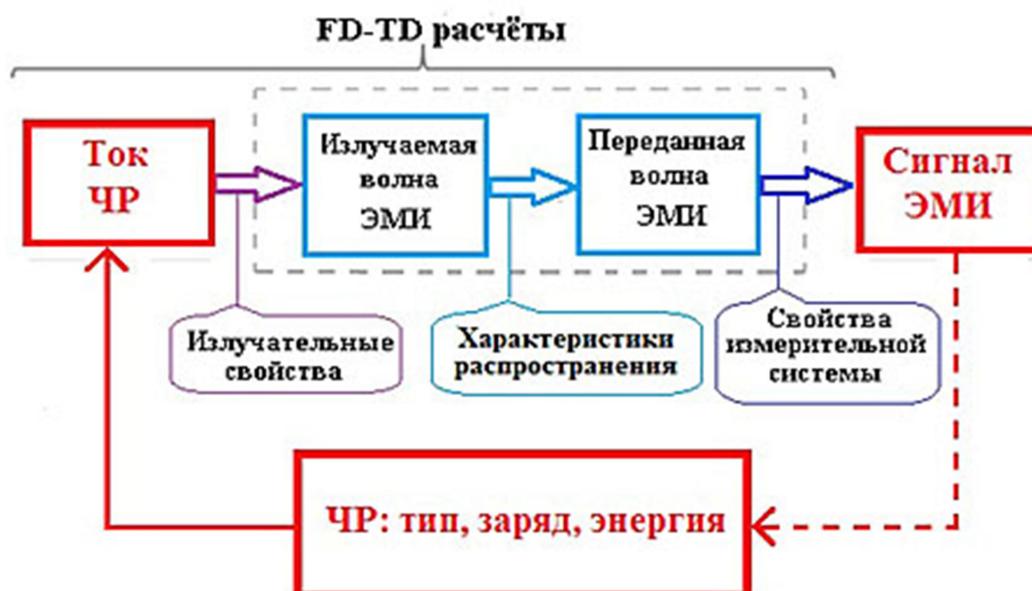


Рисунок 1.30 – Алгоритм диагностирования изоляции методом регистрации электромагнитного излучения частичных разрядов

Наиболее сложная часть интерпретации результатов диагностирования заключена в переводе измеренного антенной сигнала ЭМИ в привычные для нормирования оборудования характеристики, например, в кажущийся заряд ЧР. Наиболее тщательные исследования связи характеристик излучения и заряда ЧР продемонстрировали в [78] японские исследователи.

Основной этап заключался в расчёте напряжения на выходе ёмкостного датчика ЧР, который производился путём интегрирования распределения по радиусу электрического поля внутри коаксиальной модели КРУЭ. В качестве ЧР рассматривались соударения металлической частицы в центральный электрод (жилу), находящийся под потенциалом, во внешнюю заземлённую оболочку (корпус) и в опорный изолятор. Датчиком ЭМИ служила дисковая антенна, встроенная в корпус КРУЭ. Расчёты сигналов производились в приближении гауссовой формы тока ЧР с длительностями переднего и заднего фронтов по 240 пс и истинным зарядом 10 пКл (рисунок 1.31,а). Выходные сигналы, полученные в результате расчётов, приведены на рисунке 1.31,б. Для указанных типов соударений частицы с элементами КРУЭ они различаются цветами.

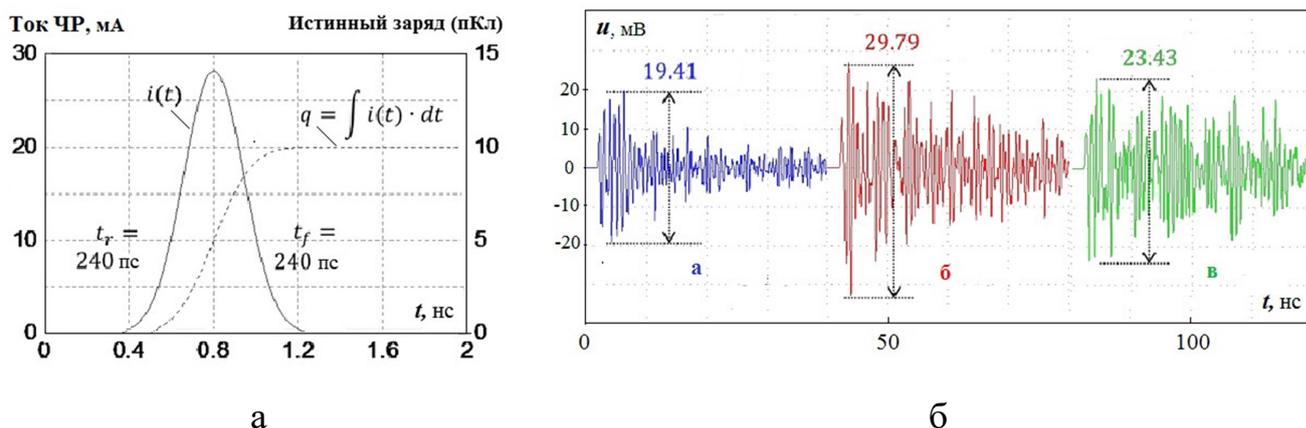


Рисунок 1.31 – Форма тока разрядки частицы (а) и сигналы электромагнитного излучения на датчике секции КРУЭ (б) при ударе частицы, слева направо: в шину, в корпус и в изолятор

В итоге расчётов по амплитудам и энергии отдельных сигналов оказалось возможным определить величину истинного заряда ЧР. При этом имело место полное совпадение оценок заряда ЧР независимо от того, что бралось за основу, энергия или амплитуда сигнала ЭМИ ЧР. По результатам исследований авторы сформулировали следующие выводы:

- ~ впервые удалось связать электромагнитные волны с истинным зарядом, не прибегая к понятию кажущегося заряда;

- ~ для металлической частицы анализ по методу FDTD дал удовлетворительные результаты практического расчёта амплитуды и энергии волны ЭМИ ЧР.

Авторы [79] после сравнения отношения ЭМИ и электрических сигналов от ЧР, связанных с четырьмя типами дефектов в модели КРУЭ, и с привлечением других экспериментальных данных пришли к следующим выводам:

- ~ энергия сигнала ЭМИ пропорциональна квадрату кажущегося заряда ЧР, причём линейность и наклон зависимости между этими характеристиками сохраняются при разных уровнях напряжения, если источник ЧР один и тот же;

- ~ тип ЧР определяет количественные характеристики зависимости между энергией и квадратом кажущегося заряда ЧР, но их пропорциональность сохраняется во всех случаях.

Приведённые примеры показывают сложность интерпретации результатов измерений и неоднозначность выводов о виде и опасности ЧР. В связи с этим напрашивается идея использования сигналов ЭМИ исключительно для отстройки от помех. Обычно, в регистраторах ЧР имеется помеховый канал. Фильтрация сигналов ЧР от помех осуществляется логической операцией запрета или удаления результата измерения сигнала, совпадающего по времени с помеховым. Для реализации изложенной выше идеи логику прибора надо перестроить таким образом, чтобы сигнал измерялся или «признавался» сигналом ЧР только в том случае, если он совпадает по времени с реперным сигналом ЭМИ.

Преимущества данного принципа наглядно продемонстрированы, например, в [81]. Метод был опробован при испытании однофазного автотрансформатора мощностью 333 МВА и напряжением обмоток 380 кВ/220 кВ/30 кВ. Были получены следующие результаты.

~ На амплитудно-фазовой диаграмме электрических сигналов (рисунок 1.32,а) видны три характерных группы сигналов стримерной короны на шинах подстанции. Группы сдвинуты на 120 градусов относительно друг друга и соответствуют амплитудам положительной полярности трёх фазных напряжений. Кроме помех от короны присутствует фоновый шум прочих помех с уровнем 2 нКл, который не позволил выделить сигналы ЧР с меньшей величиной кажущегося заряда.

~ Амплитудно-фазовая диаграмма, построенная по результатам измерения сигналов ЭМИ ЧР, не имела внешних шумов (рисунок 1.32,б). Это было достигнуто, во-первых, благодаря чувствительности только в диапазоне ультравысоких частот, и, во-вторых, за счёт размещения датчика ЭМИ-сигналов ЧР внутри бака трансформатора, экранирующего датчик от внешних помех. Диаграмма отражала вполне типичную картину для ЧР в масле, но в отсутствие возможности достоверной калибровки датчика ЭМИ-сигналов, эти данные было сложно анализировать.

~ Оставив в первой диаграмме только сигналы, совпадавшие по времени с ЭМИ-сигналами, авторы получили амплитудно-фазовую диаграмму электриче-

ских сигналов ЧР (рисунок 1.32,в), в которой были полностью отфильтрованы все помехи, в том числе, сигналы короны. Кажущийся заряд ЧР был оценен с использованием градуировочных коэффициентов, полученных по результатам стандартной калибровки, и составил 267 пКл.

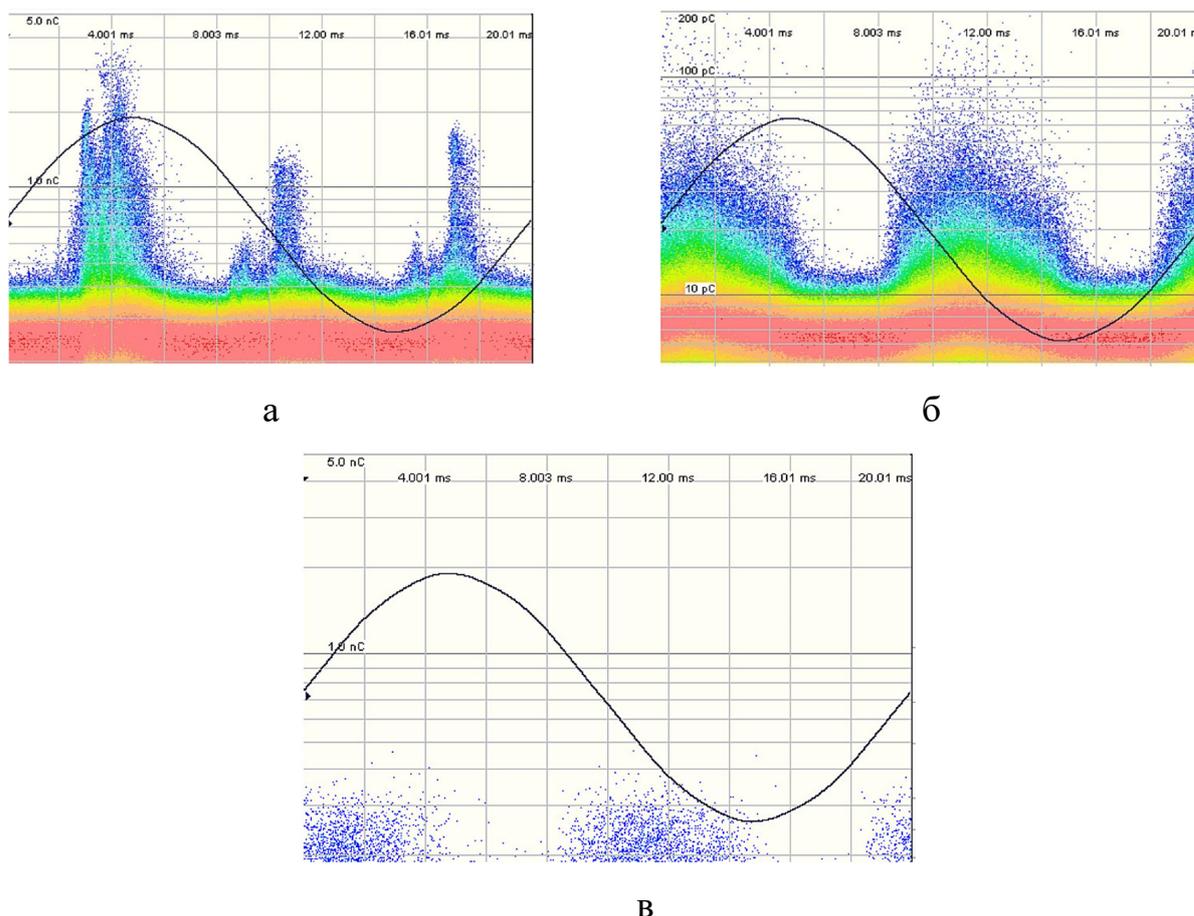


Рисунок 1.32 – Амплитудно-фазовые диаграммы электрических (а), электромагнитных (б) и отфильтрованных от помех электрических сигналов (в) частичных разрядов

Полученные результаты демонстрируют простоту и эффективность данного метода в борьбе с внешними помехами. Хотя приведённый пример касался другого объекта (трансформатора) не видно препятствий для его успешного повторения при обследовании КРУЭ как на аппаратном, так и на программном уровне.

В части приведения результатов измерений УВЧ-сигналов к привычным и, главное, нормируемым значениям кажущегося заряда выделяется работа япон-

ских исследователей [82]. В ней приведены синхронные регистрации сигналов с датчиков УВЧ (петлевые электроды по концам КРУЭ) и электрических сигналов при возбуждении ЧР в искусственных воздушных полостях (рисунки 1.33 и 1.34).

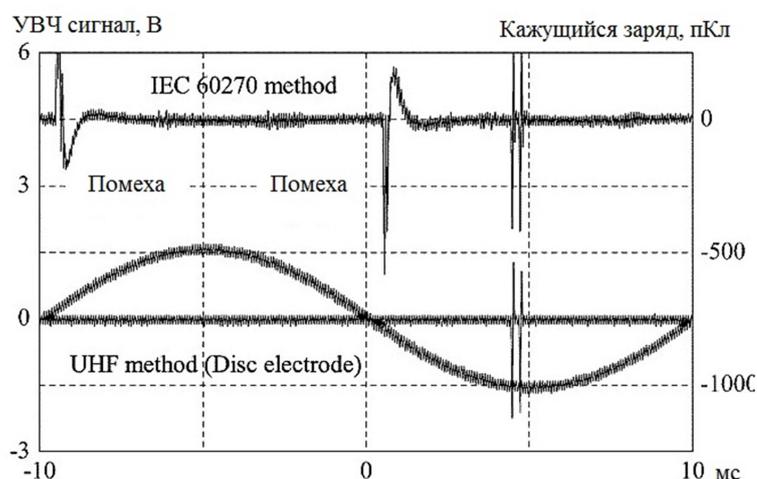


Рисунок 1.33 – Осциллограммы синхронной регистрации электрических и УВЧ-сигналов короны на выступе на токопроводе КРУЭ 420 кВ

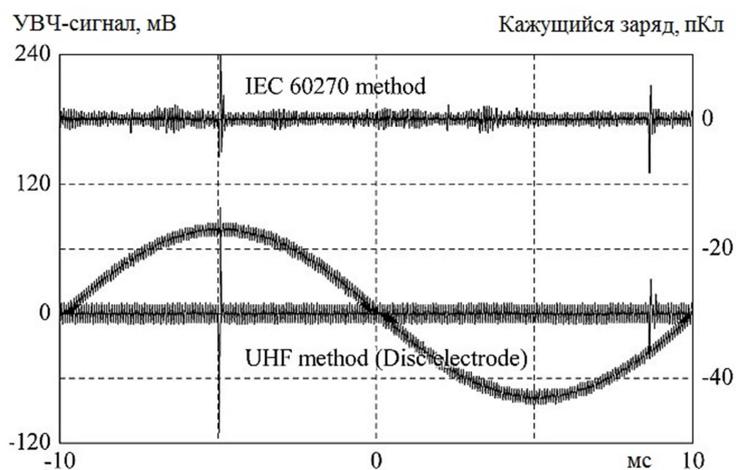


Рисунок 1.34 – Осциллограммы синхронной регистрации и УВЧ-сигналов микроразрядов от свободной частицы на оболочке КРУЭ 145 кВ трёхфазного исполнения

ЧР в этих полостях имели максимальный кажущийся заряд 10 и 50 пКл. Кроме них применялись и металлические частицы, помещавшиеся либо на электроде, либо на оболочке, но вблизи датчика электрических сигналов ЧР. Испытаниям

подвергались полномасштабные модели КРУЭ 420 кВ однофазного исполнения и КРУЭ 145 кВ трёхфазного исполнения.

В результате этих регистраций были установлены «линии связи пикового значения выходного напряжения с дискового электрода и максимального значения кажущегося заряда», приведённые на рисунках 1.35 и 1.36.

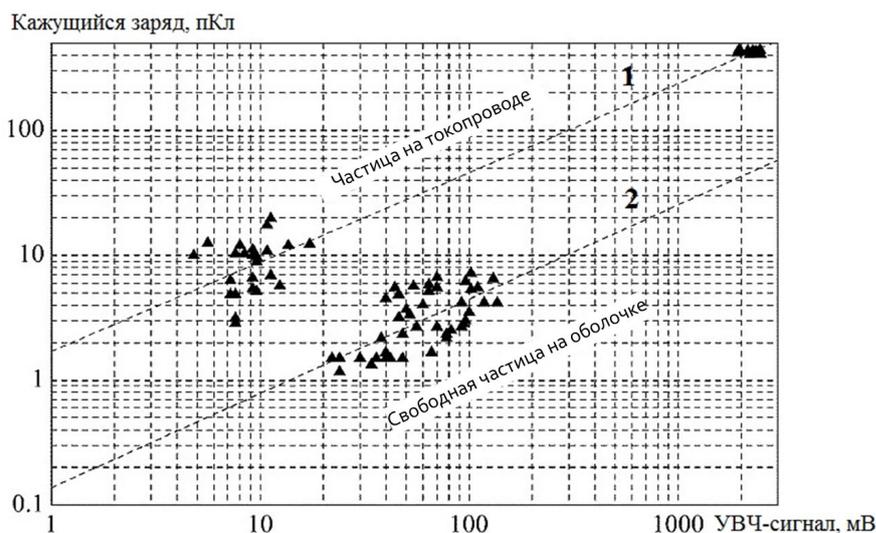


Рисунок 1.35 – Связь УВЧ-сигналов с кажущимся зарядом микроразрядов от частицы на токопроводе (1) и свободной частицы на оболочке (2)

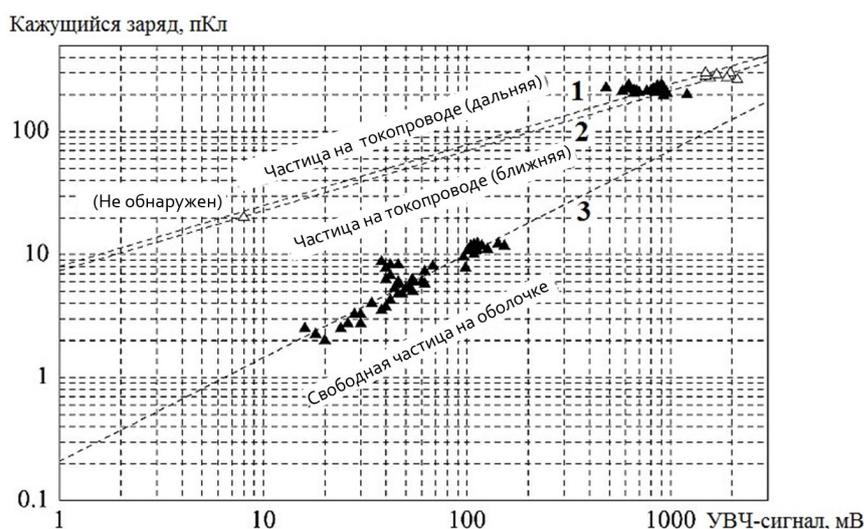


Рисунок 1.36 – Связь УВЧ-сигналов на дальней (1) и ближней (2) антеннах и кажущегося заряда микроразрядов от частицы на токопроводе (1,2) и свободной частицы на оболочке (3)

Методикам измерений электромагнитного излучения ЧР и градуировки УВЧ-датчиков в единицах кажущегося заряда уделялось большое внимание в отчётах рабочих групп СИГРЭ [72, 80] и в техническом отчёте 42-го технического комитета МЭК [83] по нестандартным методам регистрации ЧР.

Системы мониторинга. Теоретические основы для разработки систем мониторинга КРУЭ по УВЧ-сигналам ЧР были разработаны в [85] и развиты в [86]. Некоторые итоги функционирования опытной системы мониторинга интенсивности ЧР в КРУЭ 420 кВ в Шотландии подведены в [87], а системы мониторинга состояния элегаза в [88].

В блок-схеме системы мониторинга (рисунок 1.37) предусматривалась гальваническая развязка с первичными датчиками, установленными по концам каждой секции на оболочке КРУЭ, что конечно было необходимо для защиты аппаратуры от подброса потенциала на оболочке при коммутациях первичных цепей.

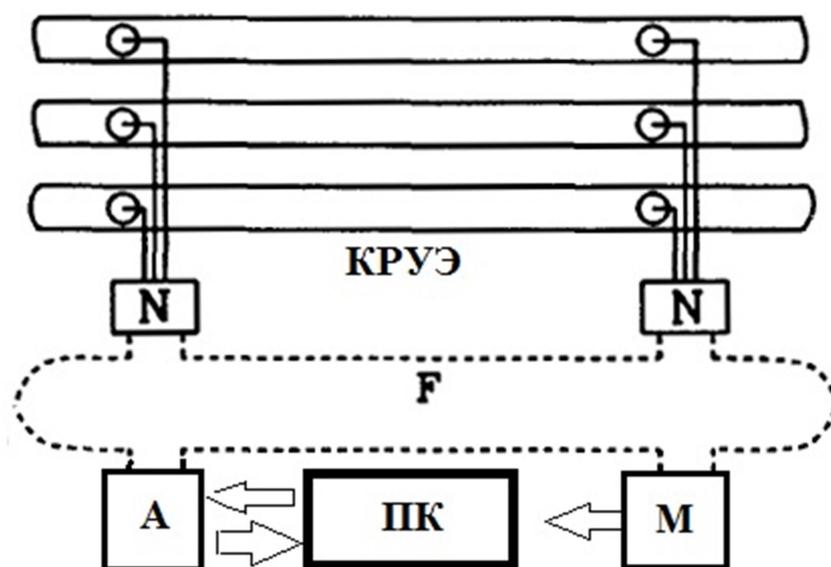


Рисунок 1.37 – Функциональная схема системы мониторинга КРУЭ: N – мультиплексор; F – оптоволоконная линия связи; А – асинхронный конвертер; М – модем

Определение вида дефекта. Определение вида и степени развития дефекта производится методами распознавания образа по характеристикам ЧР, чаще всего по форме и специфическим особенностям амплитудно-фазовых диаграмм (АФД).

Примеры АФД УВЧ- и акустических сигналов ЧР в КРУЭ 252 кВ, взятые из [89], приведены на рисунках 1.38 – 1.42. Исследовались модели пяти типичных дефектов, в том числе, частицы металла прилипшие к поверхности изолятора; свободные частицы металла на поверхности изолятора; дефект высоковольтного электрода; дефект заземлённого электрода и плохой контакт высоковольтного электрода.

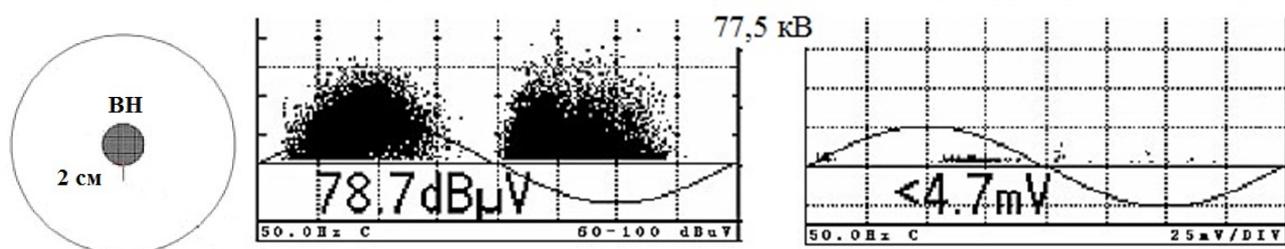


Рисунок 1.38 – острый выступ на токопроводе и амплитудно-фазовые диаграммы УВЧ- и акустических сигналов короны на нём

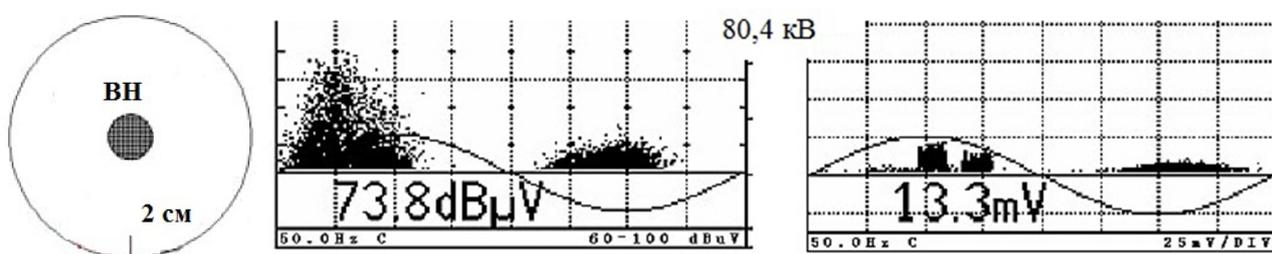


Рисунок 1.39 – острый выступ на оболочке и амплитудно-фазовые диаграммы УВЧ- и акустических сигналов короны на нём

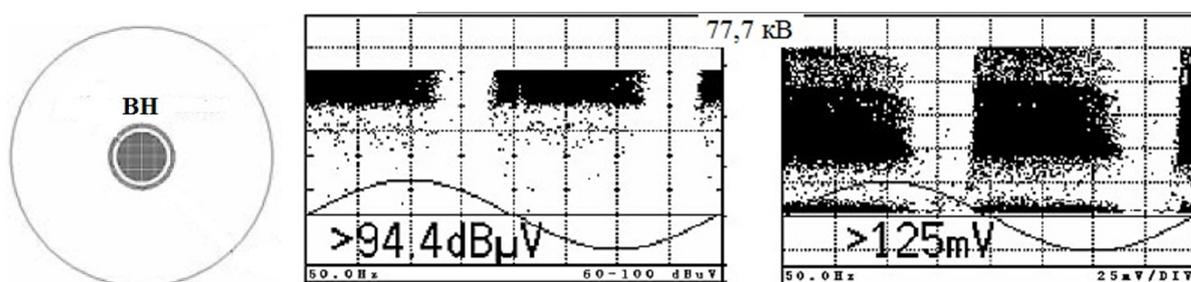


Рисунок 1.40 – неплотное крепление токопровода и амплитудно-фазовые диаграммы УВЧ- и акустических сигналов частичных разрядов в зазоре

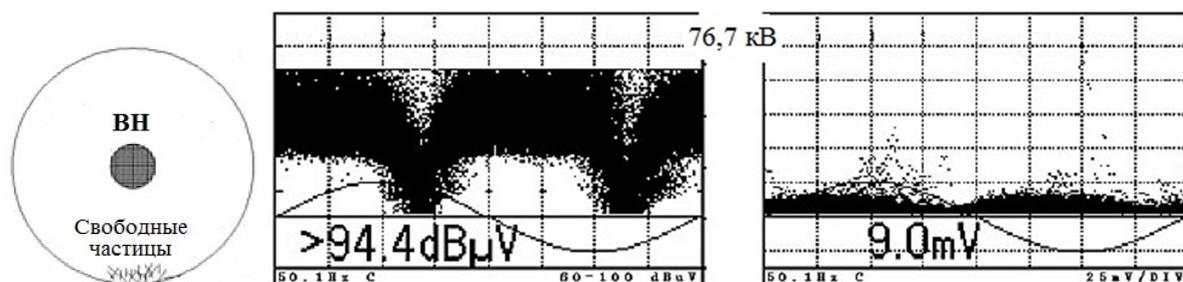


Рисунок 1.41 – свободные частицы около опорного изолятора и амплитудно-фазовые диаграммы УВЧ- и акустических сигналов микрозарядов от них

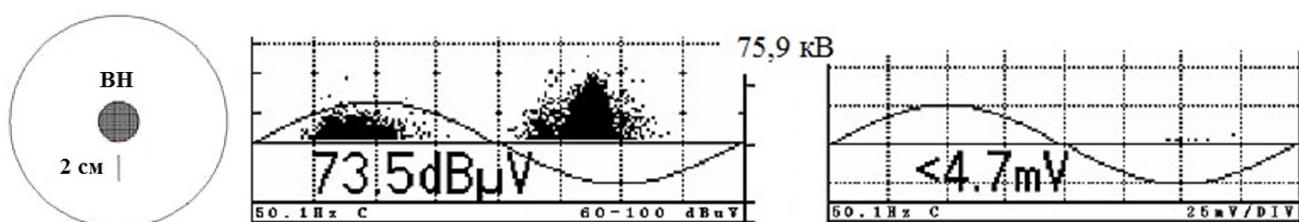


Рисунок 1.42 – металлическая частица на опорном изоляторе и амплитудно-фазовые диаграммы УВЧ- и акустических сигналов разрядов на ней

Сравнивая между собой УВЧ- и акустические сигналы видно, что акустический метод уступает электромагнитному в чувствительности к ЧР в трёх из пяти видов дефектов.

Как правило, процедура идентификации дефекта включает несколько предварительных этапов: селекцию полезных сигналов от помех, определение места расположения дефекта, определение вида дефекта и степени его развития. Обработка исходной информации проводится с привлечением математического аппарата нечёткой логики и нейронных сетей [90 – 94].

В заключение параграфа рассмотрим некоторые типы датчиков, применяемых для регистрации сигналов ЧР.

Индуктивные датчики выполняются в виде разъёмных высокочастотных трансформаторов тока (рисунок 1.43,а) или токовых клещей (рисунок 1.43,б) и в большинстве случаев устанавливаются на кабельных вводах-выводах КРУЭ, охватывая либо экран, либо поводок его заземления.



а



б

Рисунок 1.43 – Электрические датчики частичных разрядов:
высокочастотные трансформаторы тока (а) и клещи (б)

Одновременным преимуществом и недостатком датчиков данного типа является регистрация сигналов приходящих не только со стороны КРУЭ, но и со стороны кабельной линии, поэтому зона контроля ЧР оказывается более широкой.

Электромагнитные датчики ЧР представляют собой электромагнитные антенны, настроенные для работы в сверх- и ультравысокочастотном диапазоне, что позволяет отстроиться от низкочастотных помех. Датчики могут быть установлены на изоляционные швы в местах стыковки блоков КРУЭ (рисунок 1.44,а) или на внутренней поверхности оболочки КРУЭ (на заводе – изготовителе во время производства) или на смотровые лючки, выполненные из диэлектрических материалов (рисунок 1.44,б).



а



б

Рисунок 1.44 – Электромагнитные датчики частичных разрядов

УВЧ датчики ЧР являются наиболее эффективным и перспективным средством регистрации ЧР в КРУЭ. Они позволяют локализовать место происхождения ЧР в оборудовании. УВЧ регистрации отдаётся предпочтение как намного более помехоустойчивой. Границы частотных диапазонов, на которые можно ориентироваться при регистрации ЭМИ ЧР для разных мод излучения занимают диапазон от 270 до 1700 МГц.

Главная проблема при УВЧ регистрации ЧР состоит в необходимости перевода измеренного антенной сигнала электромагнитного излучения в привычные для нормирования характеристики, например, кажущийся заряд ЧР. По этой причине нет и норм на регистрируемые характеристики, однако объём исследований в этом направлении стремительно растёт. Основным руководящим документом на акустический и УВЧ-методы регистрации ЧР является стандарт МЭК 62478, первая редакция которого принята в 2014 г.

Ёмкостные датчики ЧР позволяют произвести измерения в высоковольтном оборудовании, на котором затруднён монтаж других типов датчиков, например оболочка КРУЭ.

Данные датчики представляют собой обкладку измерительного конденсатора, второй обкладкой которого является металлический корпус контролируемого оборудования. Высокочастотные импульсы от частичных разрядов наводят в металлических конструкциях оборудования высокочастотные токи, которые протекают по конструкциям и замыкаются на «землю». При помощи ёмкостных датчиков контролируется величина этих токов. В иностранной литературе данный тип датчиков обозначается аббревиатурой «TEV» - (Transient Earth Voltage), что дословно можно перевести как «переходное напряжение на землю».

Достоинством ёмкостных датчиков является возможность их оперативной установки на открытых металлических поверхностях высоковольтного оборудования и высокий уровень безопасности для персонала, так как корпус оборудования обязательно должен быть заземлён для функционирования датчиков.

Недостаток ёмкостных датчиков является то, что по корпусу оборудования протекают токи не только от высокочастотных импульсов, возникших внутри

оборудования, но и от других внешних высокочастотных процессов, поэтому выходной сигнал от ёмкостных датчиков всегда имеет высокий уровень помех.

Другой недостаток ёмкостных датчиков обусловлен тем, что в большинстве типов оборудования, в разных точках корпуса протекают различные высокочастотные токи. Это обусловлено геометрически сложной конструкцией корпусов оборудования, а также обусловлено влиянием места возникновения ЧР. В результате, при изменении положения датчика на поверхности оборудования можно получить диаметрально противоположные результаты измерений.

Реальная чувствительность всех емкостных датчиков нелинейно связана с частотой. Чем больше частота сигнала, тем выше чувствительность емкостного датчика. Поэтому применение ёмкостных датчиков эффективно при верхней частоте спектра сигналов ЧР более (50 – 100) МГц.

1.5 Методы калибровки датчиков ЧР

В электрическом методе измерения ЧР для калибровки датчиков применяют внешние калибровочные генераторы, посылающие сигнал в измерительные цепи или инжектирующие сигнал в токоведущие части установки [53]. При калибровке датчиков ЧР, измерительных цепей и регистрирующего оборудования внешние калибровочные генераторы производят инжектирование заряда в токоведущие части установки. Генератор непосредственно подключается к токоведущим цепям диагностируемого оборудования, создаётся импульс, имитирующий ЧР, далее происходит распространение сигнала в оборудовании, регистрация с помощью датчика, прохождение сигнала по измерительным цепям и его фиксация регистрирующей аппаратурой. Метод имеет ряд недостатков:

- ~ калибровка может быть произведена только на отключенном, расшинованном, т.е. выведенном в ремонт оборудовании;
- ~ большинство КРУЭ не имеют открытых токоведущих частей;
- ~ открытые токоведущие части, если они есть (например, ввод «воздух – элегаз») могут быть расположены на значительном удалении от мест установки датчиков ЧР с соответствующими негативными последствиями.

ИИЧР с применением острейного электрода. Острейный электрод изменяемой высоты позволяет создавать коронный разряд на токоведущих частях или оболочке КРУЭ. При необходимости остриё выдвигается за пределы корпуса (экрана) устройства, тем самым, создавая очаг повышенной напряжённости электрического поля и вызывая коронный разряд; в остальное время остриё спрятано за экраном, что позволяет свести к минимуму воздействие на изоляционную среду (рисунок 1.45) [77].

Для контроля импульсов тока и инжектируемого заряда в устройстве предусмотрен измерительный вывод за пределы оболочки оборудования для контроля тока и заряда импульсов короны. Регулировкой высоты выступа можно изменять величину заряда, хотя одновременно изменяется и форма импульса тока, а, соответственно, и частотные характеристики электромагнитного излучения.

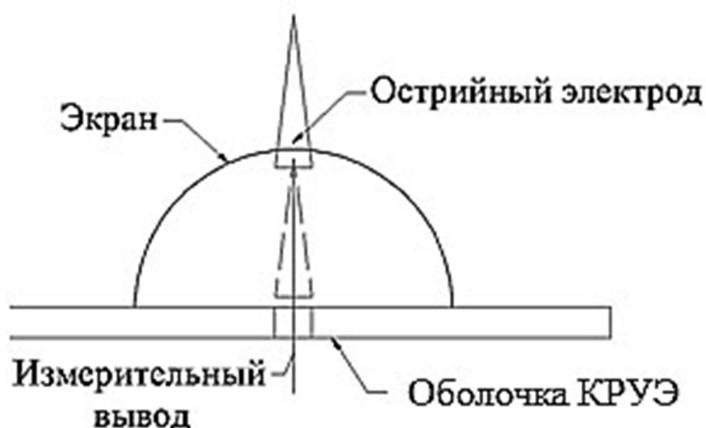


Рисунок 1.45 – Эскиз имитатора частичных разрядов в виде острейного электрода

В уже упоминавшейся работе [82] для имитации ЧР использовались искусственные полости в опорных изоляторах, а в [89] – кусочки проволоки и проводящие частицы.

1.6 Выводы по разделу и постановка задач исследований

По результатам обзора можно сделать следующие выводы.

~ Диагностирование или мониторинг технического состояния КРУЭ предполагает контроль утечек или давления элегаза и его свойств, а также обнаружение ряда дефектов на основе регистрации уровня ЧР.

~ Каждому из методов регистрации ЧР присущи недостатки и достоинства. Электрический метод имеет низкую помехозащищённость. Регистрация электромагнитного излучения ЧР в диапазоне ультравысоких частот свободна от помех. Однако, сложность интерпретации результатов измерения ограничивает внедрение метода. В этой связи представляется логичным объединить достоинства обоих методов, компенсируя их индивидуальные недостатки. Применительно к КРУЭ с кабельными присоединениями совместное применение методов позволит также разделить сигналы, относящиеся к ЧР в изоляции кабелей (муфт) и в КРУЭ.

~ Акустический метод принципиально непригоден для оценки интенсивности ЧР, но наиболее приспособлен для поиска места расположения очагов ЧР.

~ Большинство видов регистрации ЧР проводится в приёмо-сдаточных испытаниях на заводе или на месте монтажа КРУЭ, а установка систем непрерывного диагностического мониторинга требует солидных капитальных вложений.

Исходя из перечисленных выводов, автором были поставлены следующие задачи исследований.

а) Разработать метод экспресс регистрации ЧР в КРУЭ без его вывода из эксплуатации и вмешательства в его конструкцию.

б) Разработать алгоритм расчёта оптимального количества датчиков регистрации ЧР в КРУЭ.

в) Разработать технические решения для помехозащищённой регистрации ЧР в работающем КРУЭ в условиях действующей подстанции.

г) С учётом разработанных рекомендаций по проведению экспресс диагностики выполнить измерение активности ЧР в действующем КРУЭ.

д) Исследовать причины отказов вводов «воздух – элегаз» и их модификации с твёрдой RIP изоляцией.

2 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРУЭ

Настоящая глава посвящена разработке метода экспресс регистрации частичных разрядов в КРУЭ без его вывода из эксплуатации и вмешательства в его конструкцию. Особое внимание уделено изучению проблем, с которыми может столкнуться персонал при выполнении измерений и методам их решения. Основные результаты исследований опубликованы в [104 – 108, 112–113].

2.1 Экспресс диагностика

Проведение диагностических исследований и мониторинг состояния оборудования является комплексной задачей, включающей в себя подготовку, проведение измерений и анализ полученных результатов. Каждый этап содержит большое количество особенностей, которые необходимо учитывать для получения достоверных данных. Большинство ошибок при проведении диагностирования совершается на этапах измерений и интерпретации их результатов.

В настоящее время наиболее распространённые методы регистрации частичных разрядов (ЧР) в КРУЭ предусматривают вывод всего оборудования или его части в ремонт на время диагностирования либо установку стационарной системы контроля активности ЧР в режиме реального времени. Оба варианта влекут за собой значительные финансовые издержки. В случае вывода оборудования в ремонт они являются косвенными и обусловлены простоем производственного оборудования у потребителей электроэнергии, в другом случае издержки несёт будущий владелец оборудования на этапе его закупки, так как стоимость системы онлайн мониторинга может достигать 15% от стоимости самого КРУЭ [25].

В связи с этим насущной проблемой является разработка и внедрение методов экспресс диагностики комплектных распределительных элегазовых устройств. На основе анализа отечественного и зарубежного опыта были выделены следующие ключевые этапы при проведении диагностики.

- ~ Анализ конструктивных особенностей КРУЭ.
- ~ Выбор типа и места подключения датчиков ЧР.
- ~ Отстройка от внешних и внутренних помех.
- ~ Определение места расположения источника ЧР.
- ~ Определение возможных причин возникновения ЧР.
- ~ Определение степени опасности ЧР.
- ~ Формирование рекомендаций по дальнейшим действиям для эксплуатирующей организации.

2.2 Анализ конструктивных особенностей КРУЭ

Несмотря на то, что все производители руководствуются схожими принципами проектирования энергетического оборудования и применяют близкие, по сути, технические решения, даже КРУЭ одного производителя и на один и тот же класс напряжения могут иметь большое количество мелких особенностей, в конечном счете, делающих его уникальным объектом. Это не позволяет повсеместно применять типовые схемы измерений и фактически требует проектирования диагностической системы индивидуально для каждого объекта, с учётом количества возможных точек подключения датчиков и различия в типах датчиков.

Поэтому перед началом диагностирования необходимо принять во внимание конструктивные особенности конкретного объекта, провести его предварительное обследование или изучить конструкторскую документацию. Особое внимание при анализе конструкции КРУЭ уделяют следующим аспектам.

Тип исполнения КРУЭ. Отечественные и зарубежные производители выпускают оборудование на различные классы высокого и сверх высокого напряжения от 110 кВ до 1150 кВ [26]. На данные классы напряжения существует два типа исполнения КРУЭ (рисунок 2.1).

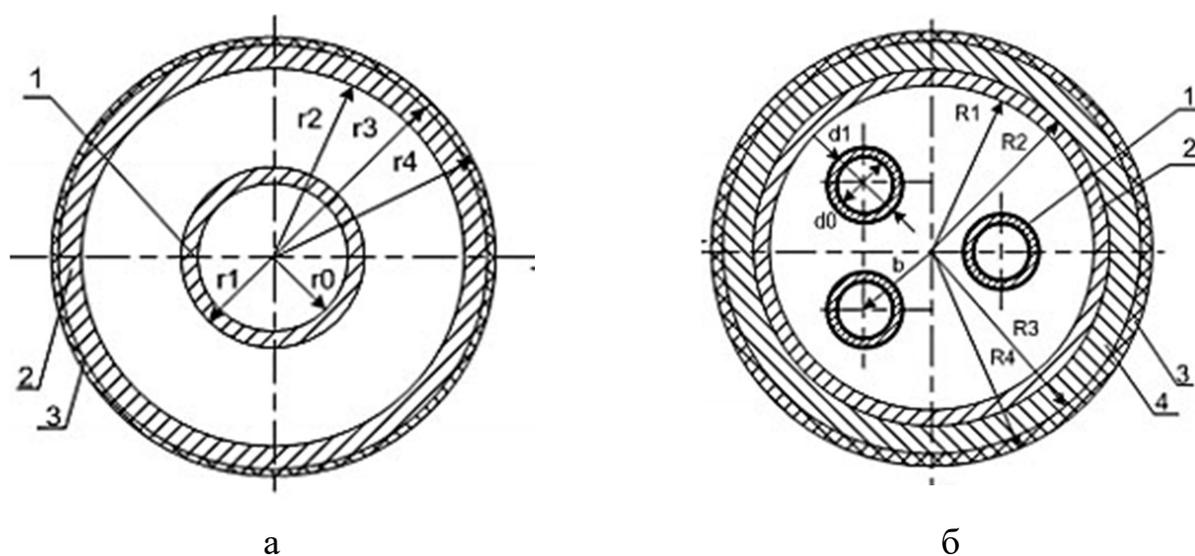


Рисунок 2.1 – Эскизы конструкций шинопроводов КРУЭ:

а – КРУЭ однофазного исполнения, б – КРУЭ трёхфазного исполнения

~ Трёхфазное исполнение в общей оболочке – токоведущие части всех трёх фаз размещаются внутри одной оболочки с общим газовым объёмом, в основном применяется для оборудования напряжением 110 кВ, реже на напряжения до 330 кВ. В сравнении с КРУЭ однофазного исполнения на тот же класс напряжения, эта конструкция имеет меньшие размеры, требует меньше материалов для изготовления, но обладает меньшей надёжностью и ремонтпригодностью из-за более сложной конструкции узлов. Помимо этого дефект оборудования одной из фаз (выключатель, разъединитель и пр.) требует замены всего отсека КРУЭ.

~ Пофазное (однофазное) исполнение – токоведущие части каждой фазы расположены в отдельных оболочках. В сравнении с КРУЭ трёхфазного исполнения обладает более высокой надёжностью, в том числе, потому что расположение токоведущих частей в отдельных оболочках предотвращает переход однофазных повреждений в двухфазные и трёхфазные. Однако этот тип исполнения имеет увеличенные габариты и более ресурсоёмок в производстве.

Тип исполнения КРУЭ оказывает серьёзное влияние на характер распространения сигналов от ЧР. КРУЭ однофазного исполнения фактически является коаксиальной линией, что облегчает расчёт распространения и затухания сигнала. В

трёхфазном исполнении присутствует фактор перенаводок сигнала с одной фазы на другую, что затрудняет определение места расположения источника сигнала.

Конструктивное исполнение соединений модулей КРУЭ. Как уже упоминалось ранее, КРУЭ состоит из отдельных модулей, соединённых между собой герметичными опорными изоляторами.

Деление КРУЭ на газонепроницаемые отсеки обеспечивает следующие преимущества:

~ При необходимости расширения подстанции, модификации ячейки или замены компонентов нет необходимости опорожнять всю подстанцию; не задействованные в данной операции отсеки могут оставаться под давлением, а отдельные участки могут оставаться под напряжением.

~ Утечка элегаза затрагивает только один отсек и легко локализуется с помощью датчиков давления, установленных на каждом газоизолированном отсеке.

~ Возможный внутренний сбой не распространяется на соседние отсеки.

Отсеки ограничены: с одной стороны, металлическими оболочками и крышками, образующими корпус КРУЭ, с другой – изолятором, расположенным внутри оболочек и выполняющим роль барьера между смежными отсеками.

Разбивка на отсеки осуществляется в зависимости от конструкции и структуры КРУЭ. Герметичные опорные изоляторы выполняются из диэлектрических материалов и являются радиопрозрачными для сигнала ЧР. Существует два основных типа установки изоляторов между отсеками:

~ изоляционная конструкция непосредственно выходит за пределы газового объёма КРУЭ, фактически являясь диэлектрической прокладкой между оболочками соседних отсеков КРУЭ (рисунок 2.2,а).

~ изоляционная конструкция фиксируется с помощью фланца внутри оболочки модуля или имеет по периметру металлическое кольцо; в таком случае соединение оболочек соседних модулей производится через фланец или металлическое кольцо (рисунок 2.2,б).

Первый тип исполнения позволяет устанавливать накладные электромагнитные высокочастотные (ВЧ) или ультравысокочастотные (УВЧ) датчики ЧР, во

втором случае оболочка КРУЭ становится цельнометаллической и применение подобных датчиков становится невозможным.

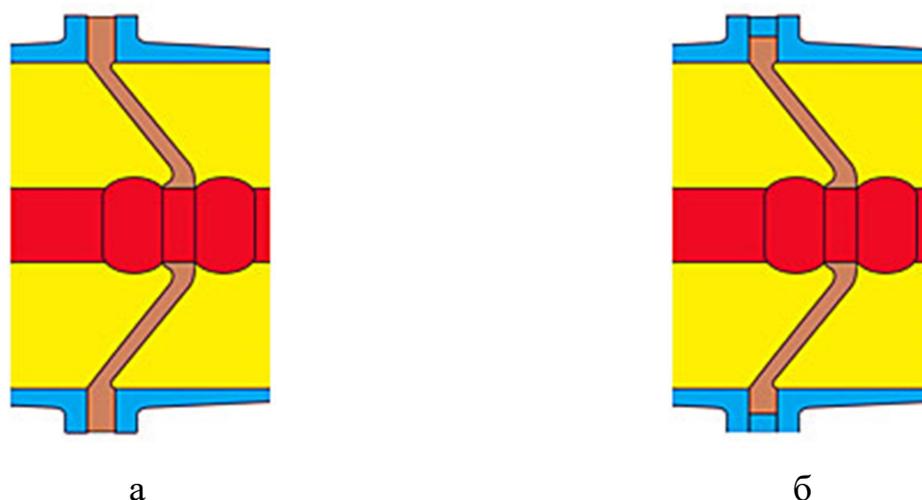


Рисунок 2.2 – Эскизы конструкции соединения модулей КРУЭ: соединение через опорный изолятор (а) и через его металлическое кольцо (б)

Диэлектрические окна в оболочке КРУЭ. В соответствии с правилами технической безопасности по эксплуатации высоковольтного оборудования все коммутационные аппараты должны быть оборудованы средствами визуального контроля положения контактов разъединителей и другого оборудования. Для визуального контроля в КРУЭ устанавливаются внешние визуальные индикаторы, напрямую механически связанные с коммутационным механизмом, или устанавливают диэлектрические окна из радиопрозрачного материала. Данные диэлектрические окна (рисунок 2.3) позволяют устанавливать накладные электромагнитные высокочастотные или ультравысокочастотные датчики ЧР.

Кабельные вводы в КРУЭ. В соответствии с требованиями обеспечения электробезопасности, неотъемлемой частью ввода высоковольтной кабельной линии в КРУЭ, является организация заземления экрана кабеля и обеспечение его электрического соединения с оболочкой КРУЭ. Таким образом, по заземляющему проводнику будет протекать сигнал наведённый источником ЧР на оболочку

КРУЭ, а установленные датчики ЧР, например, высокочастотные трансформаторы тока (ВЧТТ) обеспечат регистрацию данного сигнала.

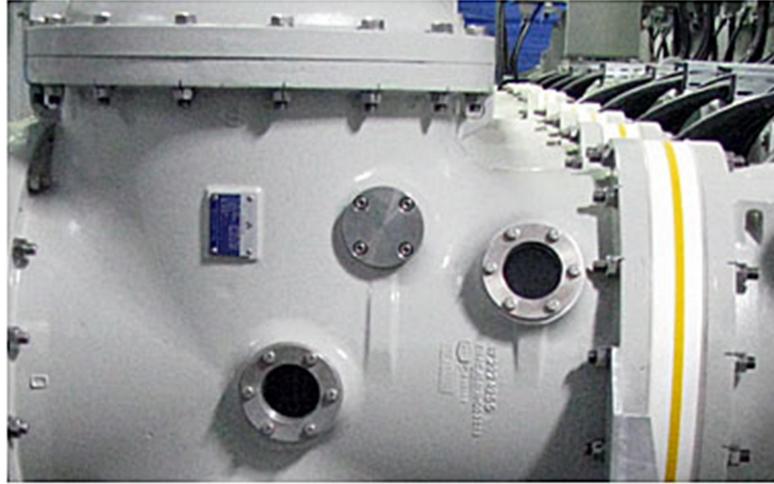


Рисунок 2.3 – Диэлектрические окна в оболочке КРУЭ 110 кВ
(ПС «Власиха 220 кВ»)



Рисунок 2.4 – Совместное заземление экрана кабельной линии
и оболочки КРУЭ в области кабельного ввода

Вводы «воздух – элегаз» с конденсаторной изоляцией. Комплектные распределительные устройства могут быть подключены к сети не только через кабельные вставки, но и с помощью вводов «воздух – элегаз». Современные вводы имеют бумажно-масляную или RIP-изоляцию и оборудованы измерительным выводом (рисунок 2.5). Тест-вывод (измерительный вывод) предназначен для измерений диэлектрических характеристик изоляции ввода. К нему могут быть подключены и приборы регистрации сигналов ЧР.

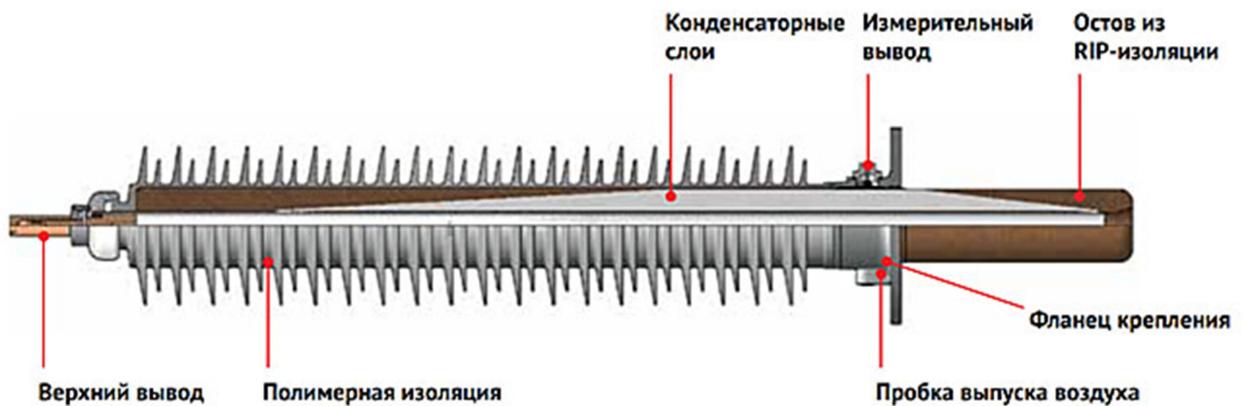


Рисунок 2.5 – Конструкция воздушного ввода с RIP-изоляцией [27]

Встроенные датчики ЧР. Большинство производителей КРУЭ в обязательном порядке оборудуют их встроенными датчиками ЧР, которые в дальнейшем используются при проведении пусконаладочных работ, но не всегда включены в систему мониторинга. Это могут быть датчики любых типов индуктивные, ёмкостные, электромагнитные, акустические в зависимости от используемой производителем методики контроля качества выполненных работ. Наличие встроенных датчиков может существенно облегчить проведение экспресс диагностики, однако производитель может наложить запрет на использование данного оборудования, сторонними организациями опломбировав разъёмы подключения измерительных приборов, и возможностью снятия оборудования с гарантии при нарушении целостности пломб.

2.3 Измерение сигналов частичных разрядов

Выбор типа и места подключения датчиков частичных разрядов. На основе анализа конструктивных особенностей для диагностируемого объекта составляется перечень мест пригодных для проведения регистрации ЧР и соответствующих им типов датчиков. Сводный перечень включает в себя регистрации сигналов от следующих датчиков ЧР:

- ~ встроенных ёмкостных датчиков ЧР;
- ~ высокочастотных трансформаторов тока (ВЧТТ) на заземляющих поводках экранов кабелей присоединений или тест-выводов вводов «воздух – элегаз»;
- ~ накладных электромагнитных датчиков на диэлектрические окна;
- ~ накладных электромагнитных ВЧ или УВЧ датчиков на диэлектрических поясах на стыках модулей;
- ~ акустических датчиков на поверхности оболочки КРУЭ.

Выбор схемы измерений сигналов частичных разрядов. Существуют различные подходы к регистрации сигналов ЧР: контроль внутреннего объёма объекта с помощью синхронных измерений в его конечных точках, равномерное покрытие объекта датчиками и синхронное измерение всех внутренних процессов, разбиение объекта на участки и последовательное их обследование.

Зачастую выбор того или иного подхода обусловлен не только конструктивным исполнением КРУЭ, но и уровнем технического обеспечения производителя работ, если быть точным, типом и количеством датчиков и видом регистрирующей аппаратуры, которая находится в его распоряжении.

Рассмотрим различные сценарии проведения измерений от наиболее быстрых и эффективных с неограниченным набором датчиков и регистрирующей аппаратуры, к схемам измерений наименее требовательным с точки зрения номенклатуры используемого оборудования.

Внутренний объём КРУЭ разделён герметичными опорными изоляторами на газоизолированные отсеки. Кроме того, конструкция КРУЭ включает в себя ветвление токоведущих частей, поэтому при распространении сигнала от ЧР вносятся

искажения в исходный сигнал, соответственно, чем дальше от источника сигнала находится датчик ЧР, тем более сложный анализ полученных данных необходимо провести для определения истинного места расположения источника сигнала и его исходных параметров.

Для обеспечения максимальной точности в определении места положения источника сигнала ЧР и качественной регистрации его параметров коллективом исследователей из корпорации Тошиба, Япония [28], предложен следующий подход к расположению встроенных датчиков ЧР (рисунок 2.6).

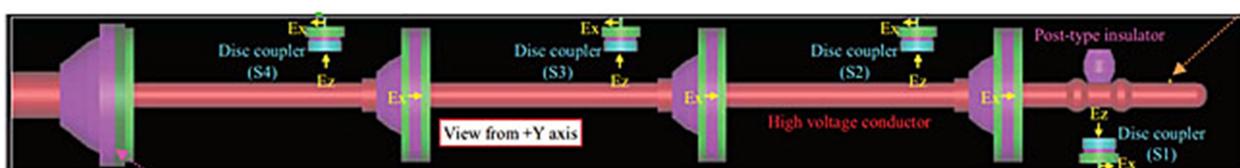


Рисунок 2.6 – Метод расположения датчиков ЧР, разработанная специалистами корпорации Тошиба

Внутри каждого газоизолированного отсека располагается датчик ЧР, такое расположение обеспечивает прямую регистрацию сигнала от ЧР без искажения конструктивными элементами КРУЭ и однозначное определение места расположения источника ЧР за счёт сравнения амплитуд сигнала зарегистрированных соседними датчиками. Основную мысль данного подхода можно сформулировать следующим образом: «Обеспечение контроля минимально возможного изолированного участка внутреннего объёма диагностируемого объекта».

Однако применение данного подхода в условиях диагностики действующего оборудования не возможно по следующим причинам. Установка внутренних датчиков ЧР, может быть выполнена только на заводе изготовителе, использование внешних датчиков возможно только в местах расположения герметичных опорных изоляторов и диэлектрических окон на оболочке КРУЭ.

Используя за основу идею контроля минимальных участков, автором была произведена адаптация метода для его использования при проведении экспресс диагностики. Идеальный случай, когда конструкция КРУЭ предусматривает вы-

ход герметичного опорного изолятора за пределы оболочки КРУЭ (рисунок 2.2,а). В этом случае накладной электромагнитный ВЧ или УВЧ датчик будет обеспечивать контроль двух соседних отсеков, а размещение датчиков на каждом изоляторе позволит производить перекрёстную регистрацию сигнала от ЧР в каждом отсеке (рисунок 2.7), реализуя, таким образом, концепцию контроля минимально возможного изолированного объёма. Понятно, что для контроля тупиковых отсеков необходима установка датчиков ЧР на вводах.

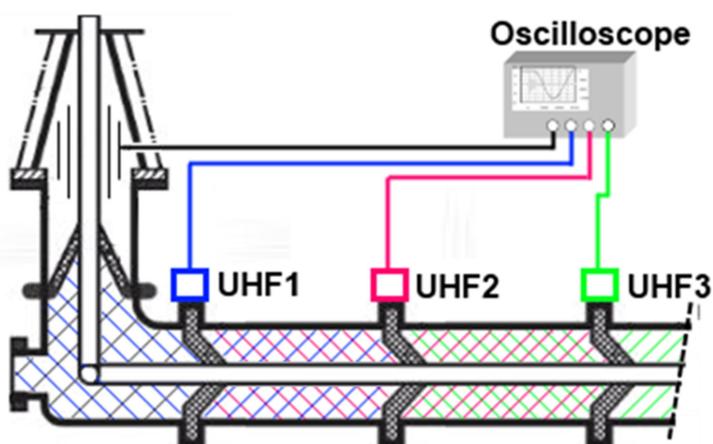


Рисунок 2.7 – Схема расположения датчиков для перекрёстного контроля отсеков КРУЭ

Максимальное количество используемых датчиков ЧР определяется суммой количества вводов в КРУЭ и количеством герметичных опорных изоляторов.

Произведём расчёт количества датчиков ЧР необходимых для полного контроля всего внутреннего объёма на примере КРУЭ 220 кВ однофазного исполнения, однолинейная схема которого приведена на рисунке 2.8. КРУЭ включает в себя две системы шин, 4 кабельных ввода и состоит из 34 отсеков, герметичные опорные изоляторы которых выходят за пределы оболочки. Таким образом, для контроля всех отсеков одной фазы КРУЭ необходима установка 38 датчиков ЧР:

- ~ 34-х накладных электромагнитных УВЧ датчиков в местах установки герметичных опорных изоляторов;
- ~ 4-х высокочастотных трансформаторов тока на заземляющих поводках кабельных вводов.

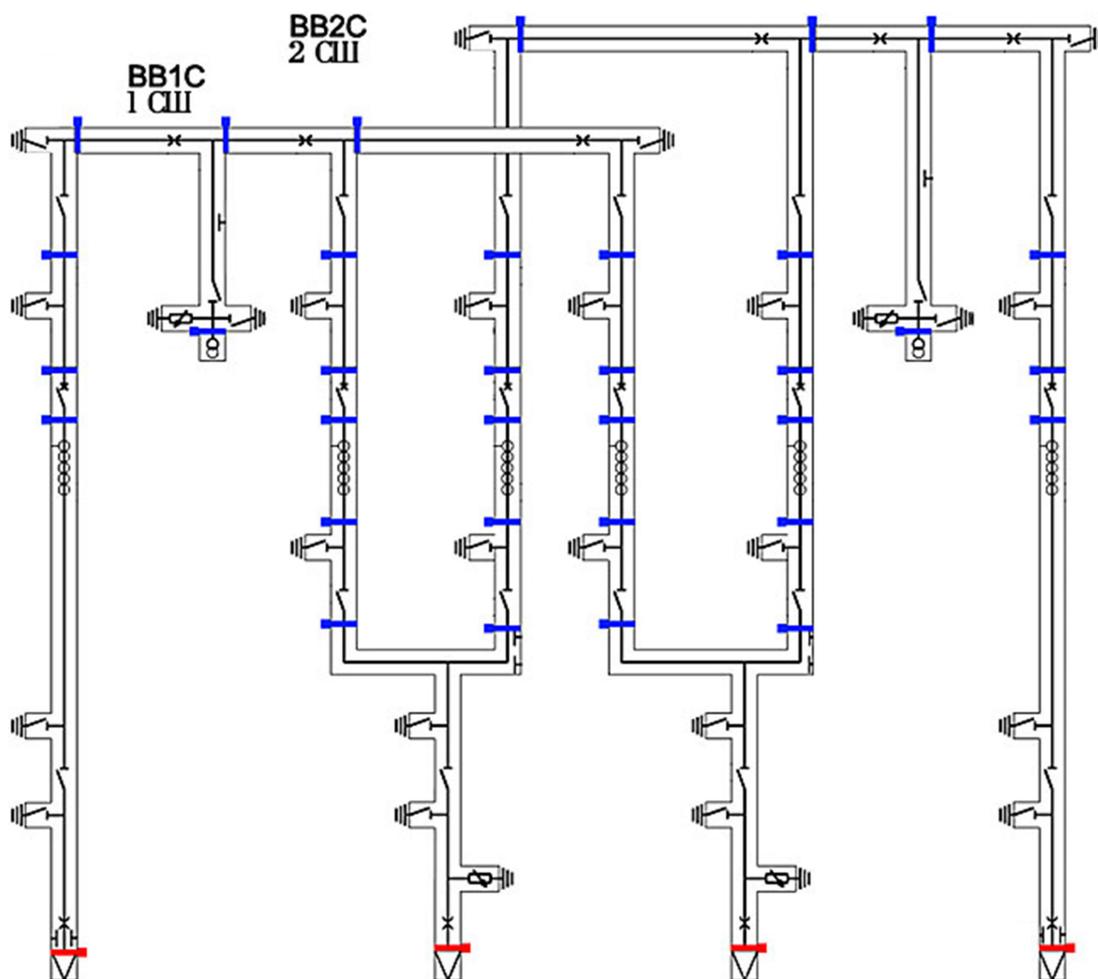


Рисунок 2.8 – Однолинейная схема КРУЭ 220 кВ:

красным цветом обозначены ВЧТТ, установленные на кабельных вводах,
синим – датчики, установленные на герметичных опорных изоляторах

Соответственно для синхронной регистрации сигналов во всех трёх фазах требуется $38 \cdot 3 = 114$ датчиков. Синхронная запись такого количества сигналов требует использования дорогостоящей многоканальной регистрирующей аппаратуры с высокой разрешающей способностью для оцифровки высокочастотных сигналов. Конечно, можно использовать мультиплексор и последовательный опрос датчиков, например, по радиоканалу. Однако этот приём исключает время – пролётный метод локализации места расположения очага ЧР. К тому же, количество датчиков остаётся тем же.

Использование такого количества датчиков позволяет контролировать каждый отсек и обеспечивает максимальную точность определение источника ЧР, однако время установки и настройки такой громоздкой системы может быть сопоставимым или превышать время проведения самой процедуры диагностики оборудования, стоимость выполняемых работ также будет чрезмерно высока в связи с большим количеством используемого оборудования.

Рассмотрим возможность уменьшения количества используемых датчиков при условии минимального снижении качества производимых измерений. Следуя концепции контроля минимально возможного объёма и для обеспечения однозначности при локации сигнала необходимо, чтобы участок ограниченный датчиками регистрации ЧР не имел ответвлений, так как их наличие существенно усложняет расчёт пути пробега волны от источника сигнала ЧР до датчика. Разбиение внутреннего объёма КРУЭ на участки без ветвлений производится с помощью установки высокочастотных электромагнитных датчиков ЧР на герметичных изоляторах во всех точках ветвления шин КРУЭ и установкой ВЧТТ на всех вводах «кабель-элегаз». В результате конструкция будет разделена на набор линейных отрезков шин, каждый из которых ограничен датчиками ЧР с обоих концов.

Однако при такой схеме расстановки датчиков между двумя ближайшими датчиками будет расположено до шести герметичных опорных изоляторов. В связи с этим необходимо оценить степень затухания сигнала при его прохождении через изоляторы.

По своей конструкции КРУЭ соответствует коаксиальной линии, центральный проводник круглого сечения и цилиндрическая оболочка вокруг, что позволяет использовать формулы расчёта параметров коаксиальной линии для расчёта параметров КРУЭ.

Коэффициент затухания с учётом потерь в коаксиальной линии рассчитывается по следующей формуле

$$\alpha = \frac{1,98 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{\varepsilon f}}{\lg\left(\frac{D}{d}\right)} * \left(\frac{\sqrt{\mu_a \rho_a}}{D} + \frac{\sqrt{\mu_b \rho_b}}{d} \right) + 9,08 * 10^{-11} f \sqrt{\varepsilon} * tg(\delta), \quad (2.1)$$

где α – затухание, дБ/м; ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции; d – диаметр внутреннего проводника кабеля, [мм]; D – диаметр внешнего проводника кабеля, [мм]; μ_a, μ_b – магнитная проницаемость внутреннего и внешнего слоя; ρ_a, ρ_b – удельное сопротивление внутреннего и внешнего слоя; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции; f – частота, [МГц].

Герметичный опорный изолятор в сравнении с остальной конструкцией КРУЭ можно представить в виде короткой линии с другими параметрами диэлектрической среды. Как правило, герметичные опорные изоляторы в КРУЭ изготавливают из эпоксидного компаунда со средним значением относительной диэлектрической проницаемости равным 6 и тангенсом угла диэлектрических потерь в районе 0,02. Толщина опорного изолятора составляет 20 мм. Так же для расчёта понадобятся исходные параметры КРУЭ:

- ~ внешний диаметр токопроводящей жилы $d=84$ мм;
- ~ внутренний диаметр оболочки КРУЭ $D=264$ мм;
- ~ оболочка КРУЭ и токопроводящие жилы выполнены из алюминия;
- ~ магнитная проницаемость алюминия $\mu=1,000023$ Гн/м;
- ~ удельное сопротивление $\rho=0,028$ Ом*мм²/м;
- ~ диэлектрическая проницаемость элегаза $\varepsilon_{\text{SF}_6}=1,0021$;
- ~ тангенс угла диэлектрических потерь элегаза $\operatorname{tg}_{\text{SF}_6}(\delta)=2*10^{-7}$;
- ~ частота колебаний электромагнитного сигнала от ЧР $f=30$ МГц.

Коэффициент затухания сигнала при прохождении излучения через один опорный изолятор в КРУЭ равен

$$\alpha_{\text{ои}} = \frac{1,98 * 10^{-8} * \sqrt{6} * 30}{\lg\left(\frac{0,264}{0,084}\right)} * \left(\frac{\sqrt{1,000023 * 0,028}}{0,264} + \frac{\sqrt{1,000023 * 0,028}}{0,084} \right) + 9,08 * 10^{-1} \\ * 30 * \sqrt{6} * 0,02 = 1,4 * 10^{-6} \text{ дБ}$$

Как показал расчёт затухание сигнала при прохождении через герметичный опорный изолятор пренебрежимо мало.

При проведении синхронных измерений сигнал, возникший внутри такого отрезка, будет зафиксирован в первую очередь концевыми датчиками данного

сегмента КРУЭ. Точное место расположение источника сигнала, будет определено с помощью расчёта разности времени прихода сигнала к датчикам, при анализе полученных в результате измерений данных. Реализация данной измерительной схемы для одной фазы КРУЭ, принципиальная схема приведена на рисунке 2.9, потребует установки: четырёх высокочастотных трансформаторов тока на заземляющих поводках кабельных вводов и шести накладных электромагнитных УВЧ датчиков в точках ветвления шин.

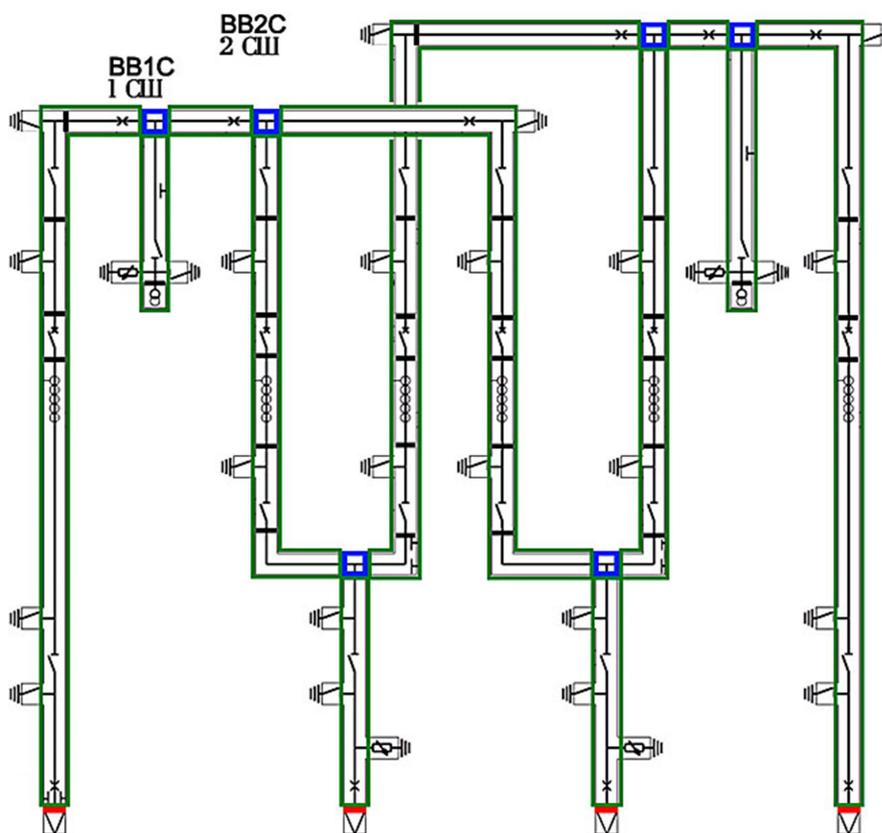


Рисунок 2.9 – Однолинейная схема КРУЭ 220 кВ:

красным цветом выделены ВЧТТ, установленные на кабельных вводах,
синим – датчики на герметичных опорных изоляторах в местах ветвления,
зелёным – линейные участки КРУЭ

Соответственно, для контроля трёх фаз потребуется установка $(4+6)*3 = 30$ датчиков ЧР, что в **3,8** раза меньше, чем при контроле всех газоизолированных отсеков КРУЭ. Дальнейшее укрупнение минимального контролируемого объёма,

а, следовательно, снижение количества используемых датчиков приведёт к появлению отсеков с ветвлениями, что существенно усложнит процедуру анализа полученных в результате диагностики данных для определения места расположения источника ЧР.

При трёхфазном типе исполнения КРУЭ количество датчиков, необходимых для установки дополнительно, снижается за счёт того, что в точке ветвления требуется установка только одного датчика вместо трёх.

На основе приведённых данных рассчитаем количество датчиков ЧР, необходимых для эффективного контроля всего внутреннего объёма КРУЭ

$$D_{\text{ЧР}} = 3 \cdot N_{\text{вв}} + T_{\text{КРУЭ}} \cdot N_{\text{ветв}}, \quad (2.2)$$

где $N_{\text{вв}}$ – количество вводов в КРУЭ; $N_{\text{ветв}}$ – количество точек ветвления шин КРУЭ; $T_{\text{КРУЭ}}$ – тип исполнения КРУЭ, для однофазного исполнения – 3, для трёхфазного исполнения – 1.

Рассчитанное по (2.2) количество датчиков ЧР является оптимальным с точки зрения качества проводимых измерений и финансовых затрат на диагностическое оборудование. Однако реализовать подобную измерительную схему не всегда представляется возможным, в силу конструктивных особенностей КРУЭ: отсутствия возможности установки электромагнитных датчиков в точках ветвления шин или ограниченного набора технических средств имеющихся в наличии: отсутствия необходимого количества датчиков определённого типа, недостаточного количества каналов на регистрирующей аппаратуре.

В этих случаях измерительная схема может быть составлена в соответствии с одним из вариантов, приведённых в таблице 2.1.

2.4 Методы снижения внешних и внутренних помех

Одним из главных препятствий при получении достоверного сигнала являются электромагнитные помехи. Источники происхождения помех могут быть самыми разными помехи от переменного тока линий электропередач промышленной частоты, низкочастотных коммуникационных систем, радио- и телевизионных передатчиков, влияющие на аналоговые измерительные приборы, осцилло-

графы и измерительные мосты. К этому можно добавить влияния переходных процессов в различных электрических цепях, чьи широкополосные высокочастотные излучения охватывают большие участки спектра.

Таблица 2.1 – Упрощённые варианты схемы регистрации ЧР в КРУЭ

Тип ограничения	Вариант измерительной схемы	Недостатки
Отсутствие электромагнитных датчиков или возможности их установки на оболочке КРУЭ	Подключение регистрирующей аппаратуры к экранам кабельных вводов высокочастотных трансформаторов тока или тест-выводам воздушных вводов.	Внутренний объём КРУЭ не делится датчиками на отсеки. Сложность локации очага ЧР.
Ограниченное количество каналов регистрирующей аппаратуры	Последовательное обследование сегментов КРУЭ.	Увеличение времени и трудозатрат на проведение обследования.
Ограниченное количество датчиков	Последовательное обследование модулей КРУЭ.	Увеличение времени и трудозатрат на проведение обследования.
Отсутствие электрических и электромагнитных датчиков или многоканальной регистрирующей аппаратуры	Последовательно обследование оболочки КРУЭ с помощью акустических датчиков.	Увеличение времени и трудозатрат на проведение обследования. Невозможность определения электрических параметров ЧР.

Для защиты от помех могут быть приняты известные аппаратные и программные методы. В числе аппаратных методов предусматривается:

~ использование активных и пассивных фильтров, в том числе, для селекции сигналов ЧР от сигналов высокочастотной связи по проводам присоединённых ВЛ (частотная селекция);

- ~ защита от короны на шинах присоединений на открытом распределительном устройстве (фазовая селекция сигналов ЧР);
- ~ селекция сигналов ЧР от фоновых помех путём использования помехового канала для блокировки измерений на время действия этой помехи или её вычитания из результата измерений;
- ~ использование автономного источника питания.

Электрические фильтры предназначены для пропускания полезного сигнала и подавления помех в цепях питания и связи. Фильтры ослабляют распространение помех вдоль проводящих линий. Их применение предполагает, что спектр частот сигнала ЧР отдален от спектра частот помех.

Фильтры подразделяются на две группы. Пассивные фильтры строятся на основе пассивных элементов – резисторов, конденсаторов и дросселей (катушек индуктивности). В активных фильтрах наряду с упомянутыми элементами используются также полупроводниковые элементы, которые требуют дополнительного питания.

Контроль уровня фонового электромагнитного сигнала. Окружающий эфир вокруг диагностируемого объекта пронизан электромагнитными сигналами различной природы. Электромагнитные ВЧ и УВЧ датчики ЧР по своей сути являются электромагнитными антеннами, несмотря на то, что датчики имеют направленные диаграммы чувствительности, они в той или иной степени улавливают внешние помехи. В тоже время оболочка КРУЭ выполнена из металла и заземлена, что делает её экраном предотвращающим распространение сигналов ЧР и других электромагнитных возмущений за пределы оболочки КРУЭ.

Таким образом контролируя окружающую объект диагностики электромагнитную обстановку и анализируя полученные в результате измерений данные, можно очистить их от электромагнитных сигналов, пришедших извне. Метод можно реализовать, например, по схеме, приведённой на рисунке 2.10.

Кроме датчиков ЧР к регистрирующей аппаратуре подключается внешняя электромагнитная антенна, с помощью которой одновременно с измерениями производится запись фоновой электромагнитной обстановки вокруг объекта. Если

при анализе полученных данных выявлены синхронные искажения полезного сигнала и искажения на осциллограмме фонового сигнала, производится классификация подобного фрагмента сигнала, как помеха и его последующее исключение из анализа.

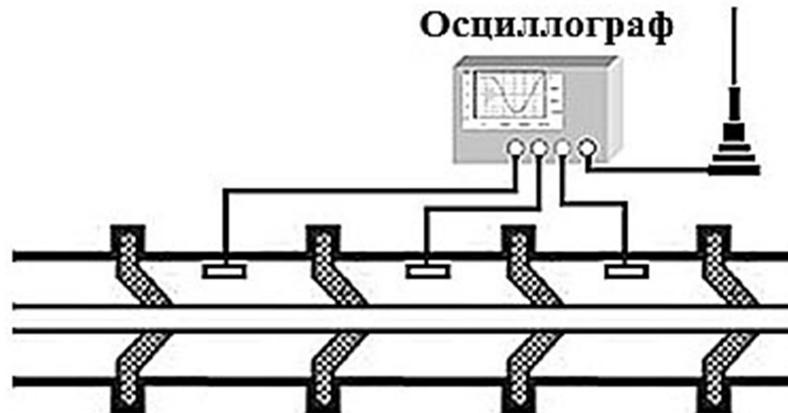


Рисунок 2.10 – Схема контроля уровня фонового электромагнитного сигнала

Использование автономного источника питания. Для обеспечения стабильной работы регистрирующей аппаратуры и её защиты от помех по питающей сети, необходимо применять автономные источники питания: источники бесперебойного питания (ИБП), аккумуляторные батареи и т.д. (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Схема подключения регистрирующей аппаратуры к автономному источнику питания

Использование оптических каналов передачи сигнала. Одним из эффективных способов защиты передаваемого сигнала от наведённых помех является использование оптоволоконна в качестве канала передачи сигнала [97 – 103].

Оптоволоконная линия имеет следующие преимущества:

- ~ широкая полоса пропускания сигнала от 0 до 200 МГц;
- ~ минимальное воздействие электромагнитного поля на оптоволоконно, обеспечивает защиту передаваемого сигнала от наведённых помех;
- ~ оптоволоконно производится из диэлектрических материалов, что позволяет без дополнительных средств реализовать гальваническую развязку и таким образом защитить, регистрирующую аппаратуру от перенапряжений, а персонал от поражения электрическим током.

Для решения задачи защиты передаваемого сигнала от наведённых помех автором разработан волоконно-оптического измерительный тракт (ВОИТ), функциональная схема которого приведена на рисунке 2.12:

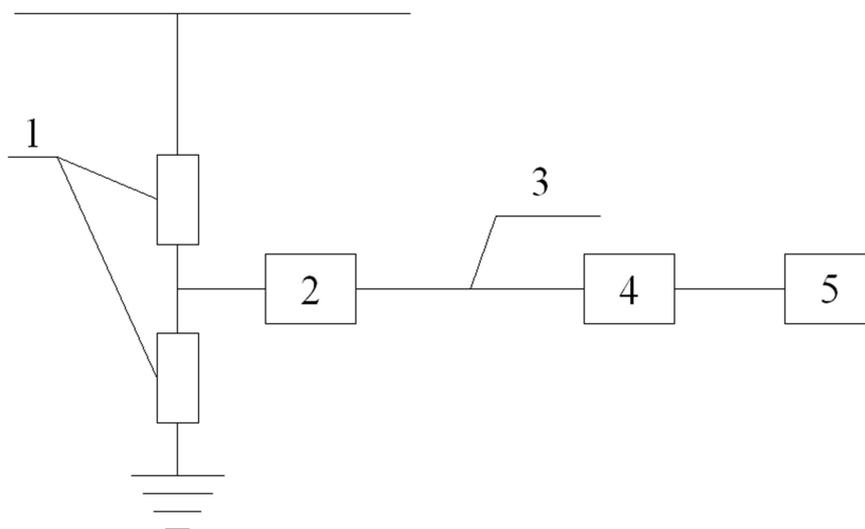


Рисунок 2.12 – Схема применения волоконно-оптического измерительного тракта:

1 – датчик, 2 – передатчик, 3 – ВОЛС, 4 – приёмник, 5 – регистрирующий прибор

ВОИТ включает в себя следующие элементы:

- ~ передатчик, преобразующий электрический сигнал на выходе датчика ЧР в оптический сигнал;
- ~ канал передачи сигнала – волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС);

~ приёмник – устройство, преобразующее оптический сигнал в электрический и передающее его на регистрирующую аппаратуру.

Передатчик ВОИТ реализован по схеме токового зеркала Уилсона, что обеспечивает высокую степень постоянства выходного тока на лазерном светодиоде и гарантирует стабильные параметры передаваемого сигнала. Приёмник, построен на основе эмиттерного повторителя, который обеспечивает усиление токового сигнала от фотодиода без изменения амплитуды его напряжения. Принципиальная схема приёмника и передатчика приведена на рисунке 2.13.

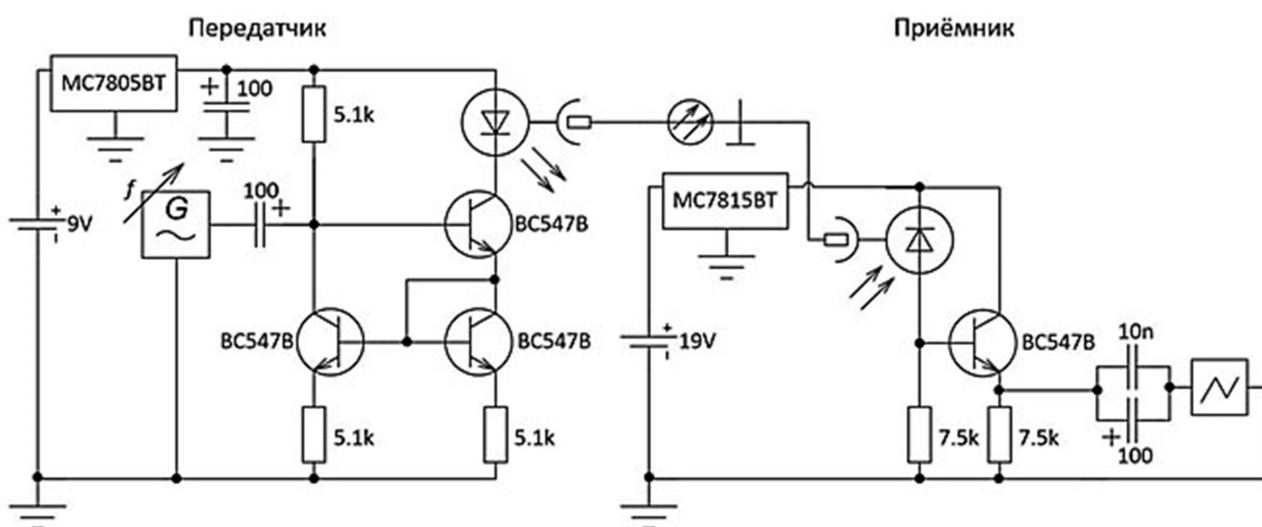


Рисунок 2.13 – Принципиальная схема волоконно-оптического измерительного тракта

Более подробно особенности схемы и характеристики волоконно-оптического измерительного тракта изложены автором в [104 – 107].

Учёт помех от высокочастотной связи. Экспресс диагностика КРУЭ производится без вывода в ремонт и, соответственно, без отключения от окружающего оборудования. Одним из стандартных источников помех при проведении диагностики является сигнал несущей высокочастотной связи. Частота подобного сигнала находится в диапазоне (10 – 1000) кГц. Отбор сигналов ВЧ-связи производится с помощью конденсаторов связи. Они устанавливаются на входном линейном портале и подключаются к проводу линии. В цепи заземления конденсаторов свя-

зи включается полосовой фильтр, настроенный на несущую частоту канала. Напряжение несущей частоты имеет величину до 100 В. Чтобы она не замыкалась входными ёмкостями подстанционного оборудования, связь с шинами осуществляется через заградительный фильтр, который представляет собой фильтр-пробку для несущей частоты. Тем не менее, на шины подстанции прорывается несколько вольт напряжения несущей частоты, которые могут значительно превышать амплитуду полезного сигнала ЧР. Ниже в главе 3 будут приведены примеры, иллюстрирующие сказанное.

В данной работе была предложена схема фильтрации низкочастотного сигнала с помощью отрезка кабеля длиной порядка одного метра с заземлённой центральной жилой на конце. Для проверки предложенного решения была собрана экспериментальная установка и выполнен ряд измерений. Экспериментальная установка включала в себя имитатор ЧР “GKI-2” в качестве источника сигнала ЧР. В качестве нагрузки к генератору были подключены согласующее сопротивление 50 Ом и конденсаторы 82 пФ и 10 нФ. В качестве фильтра верхних частот использовался кабель РК 50 длиной около метра, который на конце замыкался накоротко замыкателем З. Форма сигналов записывалась осциллографом TDS 2024 В с верхней граничной частотой 200 МГц и частотой дискретизации 2 GS/s. Схема экспериментальной установки и внешний вид приведены на рисунке 2.14.

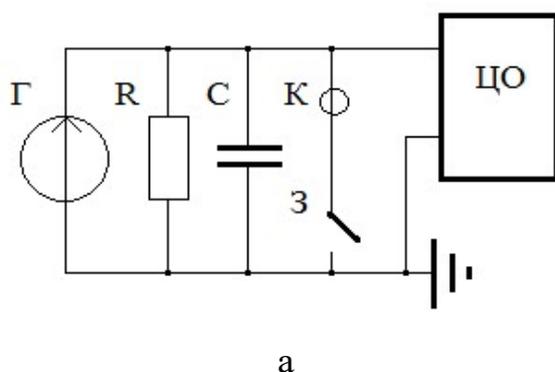


Рисунок 2.14 – Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки

На осциллограммах, полученных в результате измерений, отчётливо видно, что после подключения короткозамкнутого коаксиального кабеля происходит фильтрация низкочастотных составляющих полученных в результате отражений и преломлений исходного сигнала (рисунок 2.15 и 2.16). Для устранения остаточного искажения отрицательной полуволны на рисунке 2.15,б необходимо изменить длину короткозамкнутого кабеля.

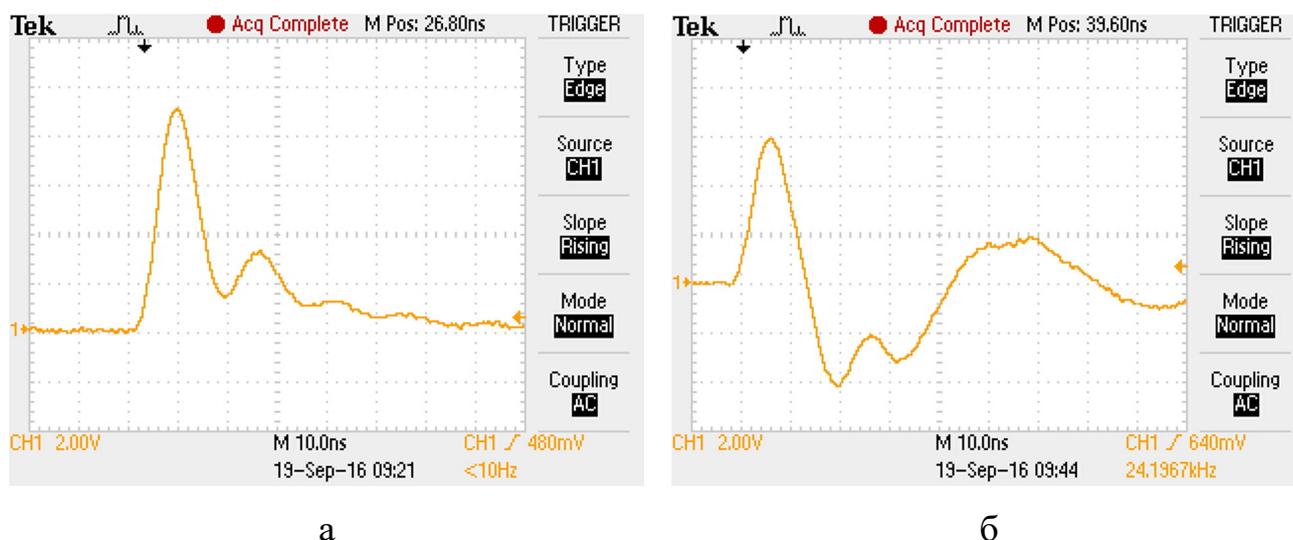


Рисунок 2.15 – Осциллограммы напряжения на согласующем сопротивлении ($C = 82$ пФ) без кабеля (а) и с замкнутым кабелем (б)

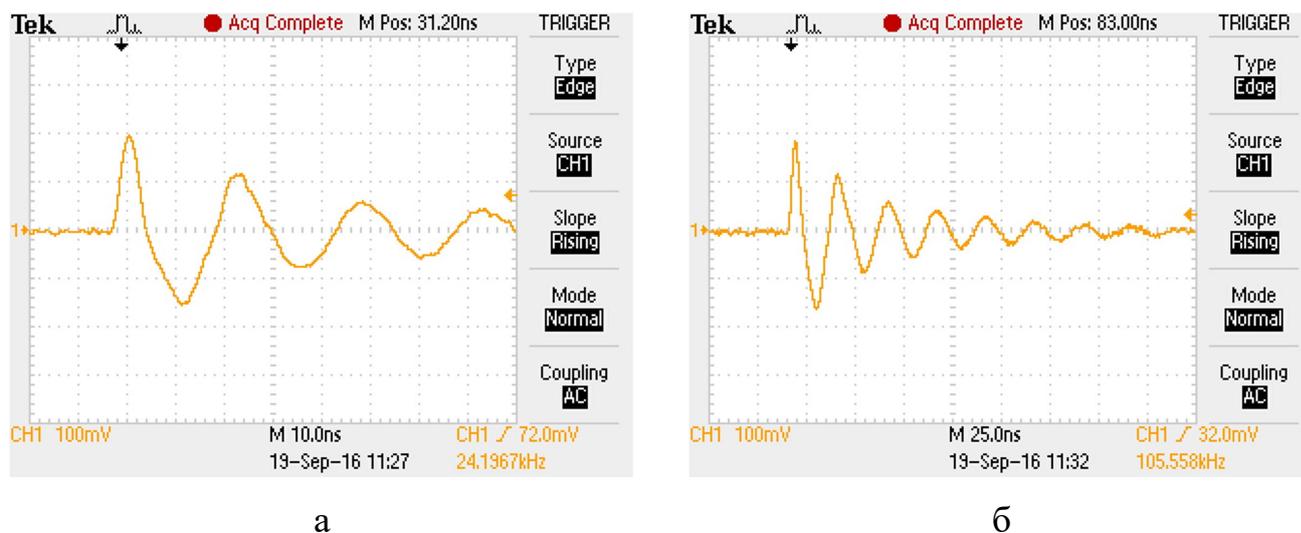


Рисунок 2.16 – Осциллограммы напряжения на согласующем сопротивлении ($C = 10$ нФ) без кабеля (а) и с замкнутым кабелем (б)

Для подтверждения полученных в результате измерений результатов в программном комплексе Open Modelica было выполнено моделирование экспериментальной установки (рисунок 2.17,а), полученные результаты соответствуют данным с экспериментальной модели (рисунок 2.17,б). Различие в скорости затухания сигнала полученного на модели и экспериментальной установке обусловлено наличием в последней паразитных индуктивностей.

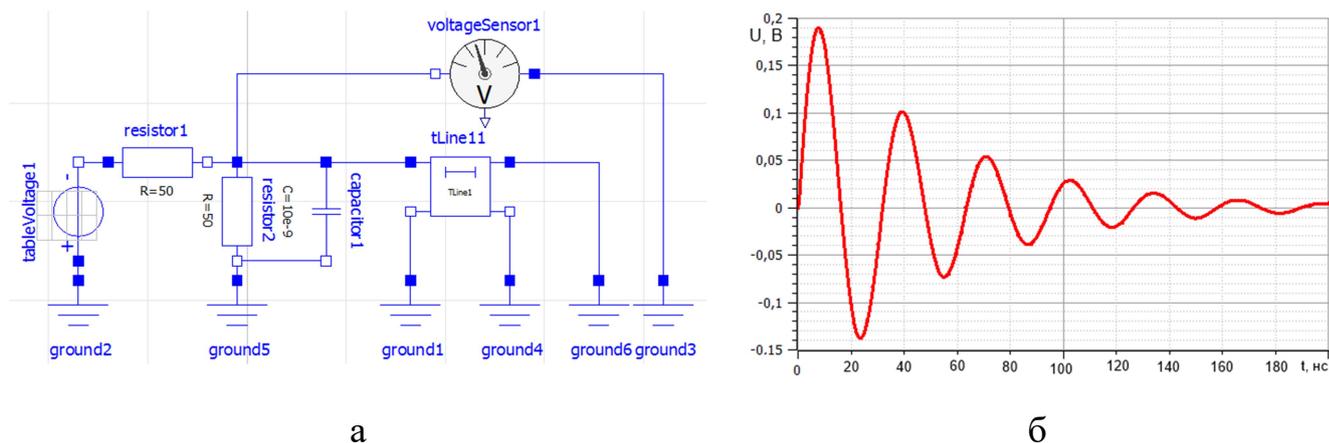


Рисунок 2.17 – Модель экспериментальной установки с $R = 50$ Ом, $C = 10$ нФ (а) и сигнал при подключённом накоротко замкнутом кабеле (б)

Приведённые выше способы борьбы с помехами относятся к аппаратным и включают в себя использование дополнительного оборудования. Помимо этого существуют целый ряд программных способов борьбы с помехами и выделения полезного сигнала из массива результатов измерений [70].

~ широкополосное измерение формы пульса и определение параметров серии импульсов [115-117];

~ регистрация амплитудно-фазовых распределений сигналов ЧР с помощью цифровых датчиков или многоканальных анализаторов различных типов [118-120];

~ количественная оценка стохастического распределения временных или фазовых интервалов между сигналами ЧР [121-122];

~ подавление помех цифровыми методами фильтрации [123].

2.5 Определение места расположения источника ЧР

Источник ЧР внутри диагностируемого объекта или за его пределами. При проведении экспресс диагностики КРУЭ не выводится из работы, следовательно, не является изолированным объектом и соединено с другим подстанционным оборудованием с помощью кабельных вставок, или с помощью ошинок подключенных через вводы «воздух-элегаз». Зачастую в окружающих объектах так же находятся источники ЧР. В связи с этим необходимо чётко отделять сигналы ЧР пришедшие со стороны внешнего оборудования от сигналов ЧР из КРУЭ.

Рассмотрим наиболее характерный случай, КРУЭ подключено к оборудованию подстанции с помощью кабельных вставок. Диагностика производится с помощью установки ВЧТТ на заземлении вводов «кабель-элегаз» (рисунок 2.9).

На одном из датчиков зарегистрирован зеркальный сигнал противоположной полярности (рисунок 2.18), что является отличительным признаком ЧР.

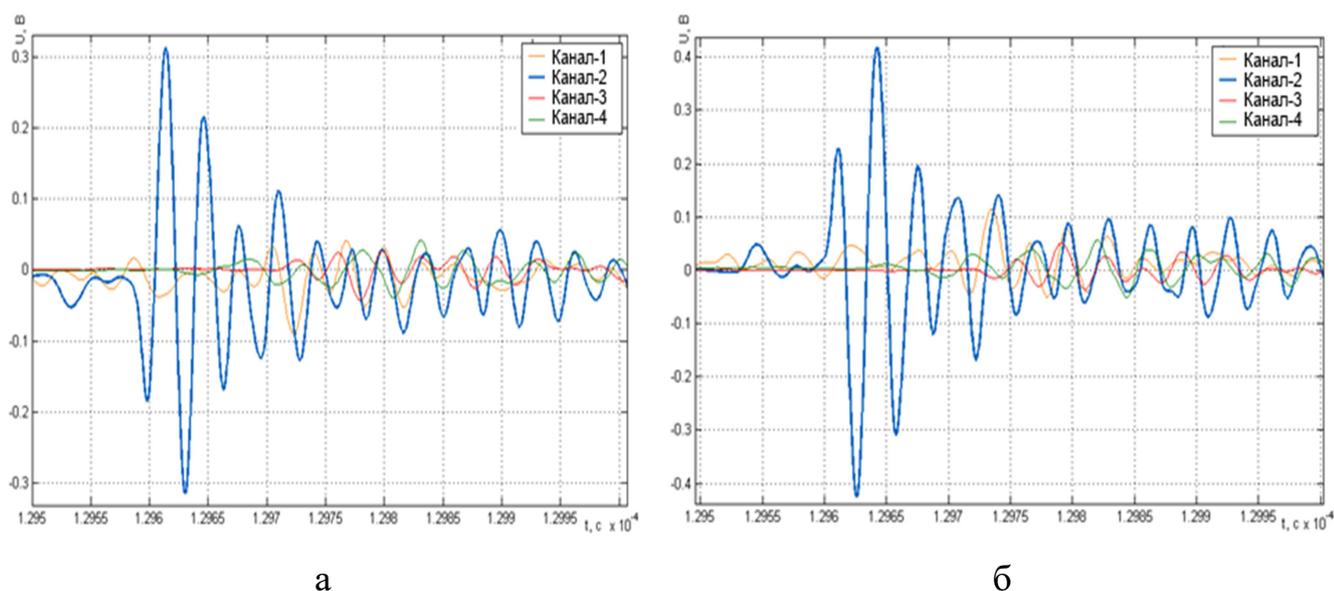


Рисунок 2.18 – Осциллограммы сигнала с 4-х вводов «кабель-элегаз» фазы «С» КРУЭ 220 кВ

Однако данный сигнал зарегистрирован только на одном канале, и его следы отсутствуют на осциллограммах с других датчиков. Таким образом, можно утверждать, что источник данного сигнала расположен за пределами контролируемого датчиками объёма, следовательно, источник ЧР находится в примыкающем

оборудовании, в кабельном вводе «кабель – элегаз» или в самом кабеле. Для определения точного расположения источника ЧР необходимо проведение диагностики кабельной вставки.

Определение точного расположения источника ЧР внутри диагностируемого объекта. Расчёт места расположения источника сигнала ЧР внутри КРУЭ производится на основе разности времени прихода сигнала на различные датчики измерительной схемы (рисунок 2.19).

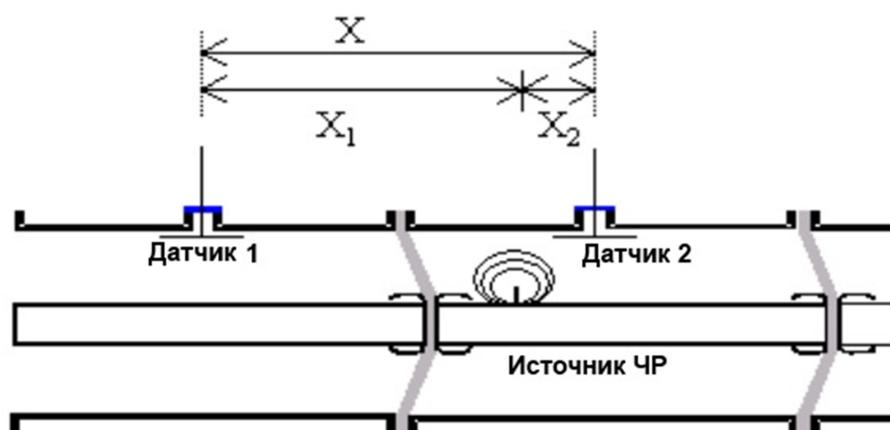


Рисунок 2.19 – Схема расчёта места расположения источника ЧР в КРУЭ [124]

Регистрирующей аппаратурой фиксируется время прихода на первый и второй датчик от источника ЧР, по конструкции КРУЭ рассчитывается расстояние X между датчиками, далее по формуле (2.3) определяется расстояние до первого датчика,

$$X_1 = \frac{X - (X_1 - X_2)}{2} = \frac{X + c \cdot \Delta T}{2} \quad (2.3)$$

где X – расстояния между датчиком 1 и датчиком 2, X_1 – расстояние от источника ЧР до датчика 1, X_2 – расстояние от источника ЧР до датчика 2, c – скорость распространения электромагнитной волны $c=0,3$ м/нс, ΔT – разница времени прихода сигнала на различные датчики.

2.6 Определение возможных причин возникновения ЧР и степени опасности для дальнейшей эксплуатации оборудования

Определение причины возникновения ЧР.

В зависимости от места расположения источника ЧР можно определить потенциально возможные причины его возникновения.

~ Очаг расположен в районе соединения двух модулей, поворота или Т-образного соединения. Характерным источником ЧР в данном месте являются опорные изоляторы, точнее, имеющиеся в них микрополости или микротрещины.

~ Очаг расположен в районе модуля с трансформатором тока или напряжения. Потенциальным источником ЧР является повреждённая изоляция данного оборудования.

~ Очаг расположен в районе модуля выключателя, разъединителя или заземлителя. Потенциальным источником ЧР являются частицы металла, образующиеся в результате эрозии контактов.

~ Очаг расположен в районе кабельного или воздушного ввода. Потенциальным источником ЧР является концевая муфта ввода «кабель – элегаз» или ввод «воздух – элегаз».

~ Очаг расположен в модуле шин не содержащем дополнительного оборудования. Потенциальным источником ЧР являются свободно перемещающиеся металлические или диэлектрические частицы, образовавшиеся в результате абляции контактов выключателей или попавшие внутрь КРУЭ при его монтаже или обслуживании.

Данную причину нельзя исключать и во всех перечисленных выше случаях.

Определение степени опасности ЧР и рекомендации по дальнейшей эксплуатации оборудования. Существующие в России нормативные документы регламентируют только один уровень интенсивности частичных разрядов в КРУЭ, не более 10 пКл. Измерения проводятся при повышенном напряжении, рассчитываемом по формуле (2.4) [125].

$$U_{\text{исп}} = 1,1 \cdot U_{\text{н.р.}} \cdot \sqrt{3}, \quad (2.4)$$

где $U_{\text{н.р.}}$ – наибольшее рабочее напряжение, кВ.

В соответствии с [134] измерения необходимо проводить на выведенном из работы оборудовании с использованием специального испытательного трансформатора. Данная норма в большей степени применима для заводских и приёмосдаточных испытаний. При проведении экспресс диагностики действующего оборудования, необходим более широкий набор диапазонов для описания промежуточных состояний оборудования и соответствующих им рекомендаций.

Интенсивность ЧР в величинах кажущегося заряда может быть отранжирована следующим образом:

~ Менее 10 пКл [125] – безопасный уровень ЧР. Оборудование находится в хорошем техническом состоянии, дальнейшая эксплуатация возможна без ограничений.

~ (10 – 20) пКл – повышенный уровень ЧР. Необходим периодический контроль уровня ЧР, при росте интенсивности ЧР во времени, необходимо провести осмотр при ближайшем сервисном обслуживании КРУЭ.

~ (20 – 100) пКл [60] – предаварийный уровень ЧР. Необходим непрерывный контроль уровня интенсивности ЧР, требуется провести детальное обследование места возникновения ЧР при ближайшем плановом обслуживании КРУЭ. При быстром росте интенсивности ЧР во времени, необходимо вывести оборудование в ремонт.

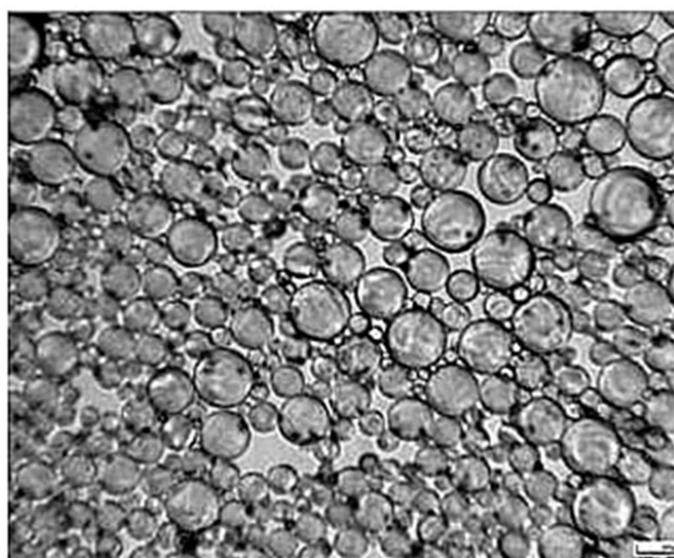
~ 100 пКл и более – аварийный уровень ЧР. При стабильном уровне интенсивности ЧР необходим непрерывный контроль на протяжении длительного временного периода. При продолжающемся росте интенсивности ЧР необходимо принятие незамедлительных мер по выводу оборудования в ремонт и устранению дефекта.

Градуировка схемы регистрации частичных разрядов. В главе 1 уже говорилось о трудностях интерпретации сигналов электромагнитного излучения ЧР в шкале энергетических характеристик, например, в величинах кажущегося заряда. В исследовательских работах по электромагнитному методу применялось создание глухих микрополостей в изоляционных конструкциях, размещение металлических частиц на токоведущих частях или внутренней стенке корпуса установки

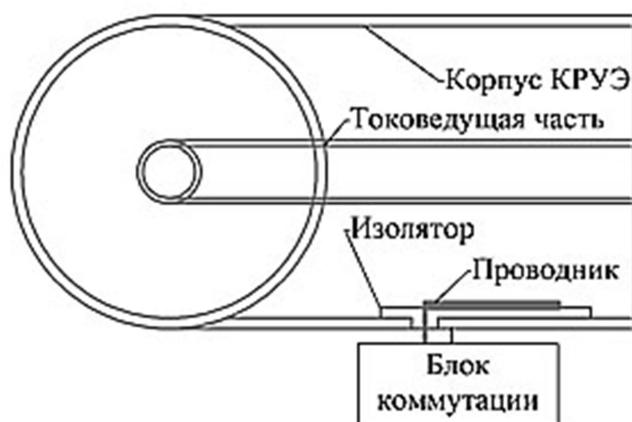
для имитации ЧР [79]. Этот же способ можно применить для проверки работоспособности акустического метода. Однако и тот, и другой способ приводят к старению диэлектрика или к разложению элегаза.

Таким образом, актуальной задачей является создание искусственных источников или имитаторов частичных разрядов (ИИЧР), не вызывающих деградации изоляции оборудования и совпадающих с реальными ЧР по пространственно-временным и энергетическим характеристикам, а, значит, универсальных, т.е. пригодных для калибровки аппаратуры, реализующей любой из перечисленных методов. Ниже представлены две перспективные идеи имитации ЧР [108].

Имитация ЧР с применением полых микросфер. Для имитации предлагается использовать ЧР в замкнутых тонкостенных шариках, например, стеклянных или в так называемых микросферах. Последние извлекаются из электрофильтров, смонтированных в дымовых трубах тепловых электростанций. Они представляют собой полые сферы с тонкими стенками из окиси алюминия (Al_2O_3) диаметром от 2 мкм до 0,5 мм (рисунок 2.20,а).



а



б

Рисунок 2.20 – Предлагаемые способы имитации частичных разрядов: полые стеклянные микросферы (а) и полосковая линия (б)

Внутри микросфер находится воздух с несколько повышенным содержанием двуокиси углерода и давлением немного ниже атмосферного. Использование микросфер для имитации ЧР в КРУЭ имеет ряд преимуществ:

~ ЧР в микросферах сопровождаются импульсами электрического тока во внешних цепях и электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, а также ультразвуковыми волнами;

~ ЧР возникают в изолированном пространстве, не вызывая деградации элегаза в отсеках КРУЭ;

~ Различные размеры микросфер позволяют варьировать временные параметры импульсов тока (а, соответственно, и частотные спектры электромагнитного излучения) и энергетические (кажущийся заряд) характеристики ЧР.

Имитация сигналов ЧР с применением полосковой линии. Полосковая линия— линия передачи энергии сверхвысоких частот, состоящая из проводящей полоски и основания (заземлённой проводящей пластины). Имитатор на основе полосковой линии может быть использован только для имитации электромагнитного излучения, создаваемого ЧР. Данное устройство представляет собой тонкую проводящую полоску, смонтированную, но изолированную от внутренней стенки оболочки КРУЭ, от которой через газонепроницаемый высокочастотный разъём выполнен вывод за пределы оболочки (рисунок 2.20,б).

Полосковая линия может работать в активном режиме – зарядка линии производится через блок коммутации, или пассивном режиме – зарядка линии происходит посредством индукции от токоведущих частей. Коммутация линии на корпус производится высокоскоростными транзисторами. Изменяя параметры проводника, можно добиться требуемой формы, длительности и мощности сигнала.

Устройство может применяться для исследования затухания ВЧ сигнала от ЧР при прохождении через диэлектрические барьеры и изгибы конструкции КРУЭ, при заводской установке в КРУЭ использоваться для калибровки высокочастотных датчиков регистрации ЧР, как во время пусконаладочных работ, так и для повторной калибровки датчиков в течение всего срока жизни оборудования. Использование данного устройства также не приводит к разложению элегаза.

2.7 Выводы по разделу

~ Разработано устройство передачи сигнала по ВОЛС, обеспечивающее защиту от наведённых помех и гальваническую развязку регистрирующей аппаратуры и диагностируемого объекта.

~ Предложен способ очистки сигнал от низкочастотных помех с помощью фильтра верхних частот на основе отрезка коаксиального кабеля, замкнутого на заземлённом конце его экрана.

~ Разработан алгоритм расчёта оптимального количества датчиков ЧР для проведения экспресс диагностики КРУЭ.

~ Предложены новые способы имитации ЧР для градуировки схемы регистрации ЧР.

3 ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЭКСПРЕСС ДИАГНОСТИКИ ЧР НА ПРИМЕРЕ КРУЭ 220 кВ ПС «ВЛАСИХА»

В главе 2 были приведены аргументы в пользу метода оперативной диагностики КРУЭ. Более подробно они изложены нами в [112, 113]. Настоящая глава посвящена апробированию метода экспресс регистрации частичных разрядов на примере диагностики технического состояния КРУЭ 220 кВ ПС «Власиха» город Барнаул. В декабре 2014 и феврале 2015 на подстанции были проведены исследования по выявлению активности ЧР в КРУЭ 220 кВ и оценке его технического состояния.

3.1 Конструкция обследованного КРУЭ

КРУЭ на номинальное напряжение 220 кВ, произведено компанией AREVA, конструктивно выполнено в однофазном исполнении. Реализовано по схеме 9Н – одна рабочая секционированная по числу трансформаторов система шин с подключением трансформаторов к секциям шин через развилку из выключателей. Каждая секция имеет один кабельный ввод, соединяющий КРУЭ с помощью кабельной вставки с питающими ВЛ 220 кВ. Между собой шины соединены через две цепи, состоящие из двух последовательно включённых выключателей, в средней точке которых расположен кабельный ввод, соединяющий КРУЭ с силовыми автотрансформаторами 220/110/10 кВ. Каждая секция шин оборудована измерительным трансформатором напряжения. Характеристики, схема и компоновка КРУЭ приведены в приложении А.

В качестве изоляции используется элегаз SF₆, под давлением 0,63 МПа (6,3 Бар), при температуре 20°C. На оболочке КРУЭ расположены диэлектрические смотровые окна, предназначенные для визуального контроля положения коммутационных аппаратов (рисунок 3.1).

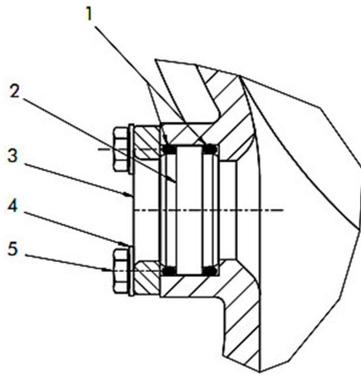


Рисунок 3.1 – Эскиз и внешний вид смотрового окна:

1 – прокладка, 2 – окошко, 3 – фланец, 4 – шайба, 5 - винт

Газоизолированные отсеки КРУЭ разделены между собой опорными изоляторами (спейсерами). Опорный изолятор устанавливается в выемку одного из отсеков и прижимается к нему с помощью фланца, затем происходит присоединения следующего отсека. Герметичность отсека достигается с помощью многослойных прокладок устанавливаемых в пазы между фланцем и оболочками отсеков и кольцевой прокладки устанавливаемой непосредственно вокруг изолятора (рисунок 3.2).

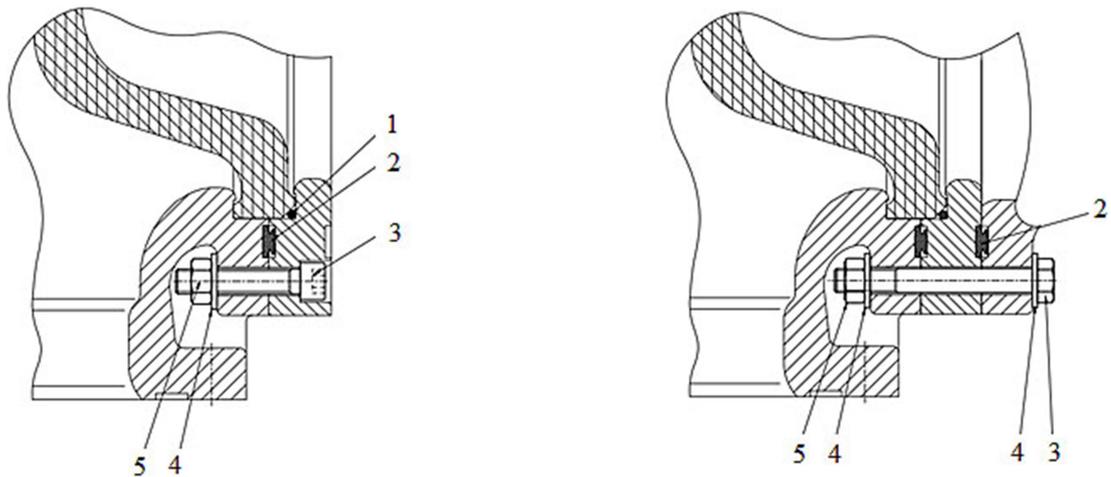


Рисунок 3.2 – Эскизы двух вариантов крепления газонепроницаемых опорных изоляторов: 1 – кольцевая прокладка, 2 – многослойная прокладка, 3 – винт, 4 – шайба, 5 - гайка

Каждый газоизолированный отсек КРУЭ оборудован плотномером со стрелочной индикацией для осуществления непрерывного считывания показаний давления. Плотномер со стрелочной индикацией включает в себя систему температурной компенсации, контролирует давление, т.е. плотность газа и позволяет обнаружить любую утечку элегаза.

КРУЭ снабжено УВЧ датчиками ЧР (рисунок 3.3,а).

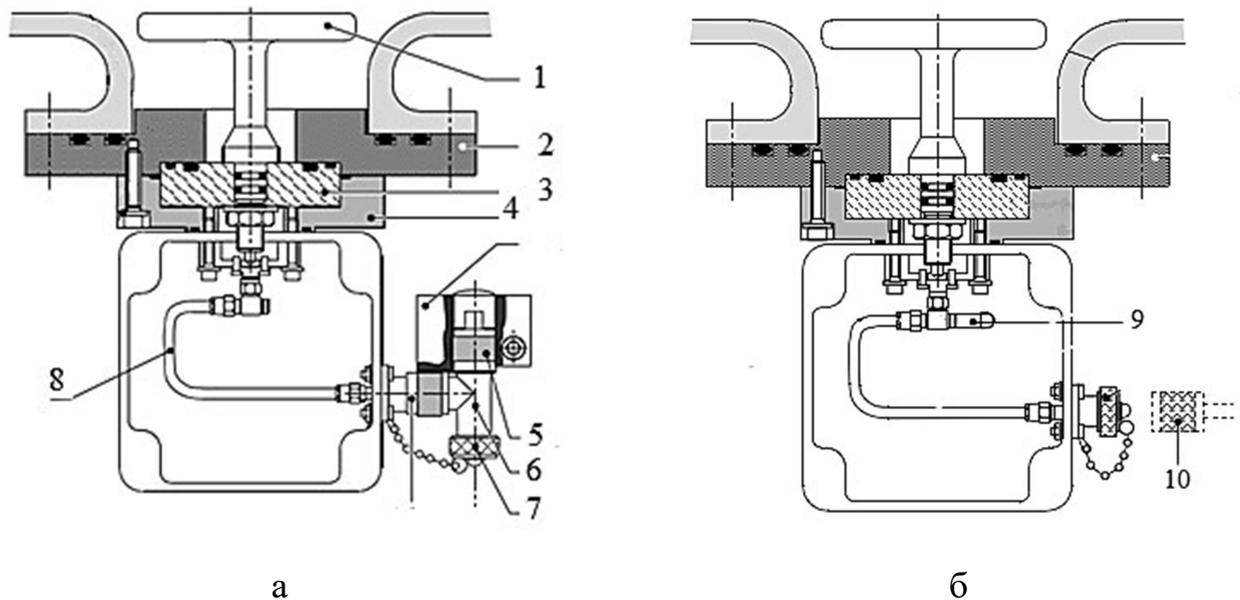


Рисунок 3.3 – эскизы дискового датчика ЧР (а) и датчика напряжения (б):
1 – диск, 2 – фланец, 3 – изолятор, 4 – корпус, 5 – варистор, 6 – коаксиальный тройник, 7 –заземляющая заглушка, 8 – кабель, 9 – тройник, 10 - разъём

Они позволяют обнаружить и локализовать дефект внутри КРУЭ, если он вызывает ЧР. На каждой фазе оболочки КРУЭ размещено шесть датчиков ЧР: два рядом с вводами «кабель – элегаз» от питающих ВЛ, два в районе кабельных вводов к автотрансформаторам и два на секциях с трансформаторами напряжения.

Датчик ЧР представляет собой металлическую антенну, в виде диска помещённого в газовый отсек, диск закреплён на изолирующем фланце. К выводу антенны подключён коаксиальный кабель, оканчивающийся разъёмом, на котором установлен тройник, включающий в себя ограничитель перенапряжения, защи-

щающий от неправильного присоединения измерительного оборудования и заземляющую заглушку.

Ёмкостный датчик напряжения позволяет детектировать напряжение внутри оболочки и имеет практически ту же конструкцию, что и датчик ЧР (рисунок 3.3,б). Подсоединение кабелей к датчикам осуществляется в соответствии с требованиями стандарта МЭК.

При обследовании КРУЭ автор столкнулся со следующими проблемами.

~ Встроенные датчики ЧР были опломбированы производителем с предупреждением, что снятие пломб влечёт за собой потерю гарантии.

~ Диэлектрические окна в оболочке имеют малый диаметр и не позволяют расположить в них электромагнитные датчики.

~ Опорные изоляторы зафиксированы металлическими фланцами, что не позволяет разместить на них электромагнитные датчики.

Таким образом, проведение измерений электрических параметров ЧР на данном оборудовании возможно только со стороны кабельных вводов с использованием ВЧТТ, охватывающих оболочки или заземляющие поводки.

Перед началом работ по регистрации сигналов ЧР была выполнена общая оценка технического состояния КРУЭ.

Внешний осмотр включал в себя:

- ~ Осмотр оболочки КРУЭ (рисунок 3.4,а);
- ~ Осмотр информационных табличек (рисунок 3.4,б);
- ~ Осмотр вводов «кабель – элегаз» (рисунок 3.4,в);
- ~ Контроль соответствия положения коммутационных аппаратов и индикаторов их положения;

~ Контроль показаний датчиков плотности элегаза (рисунок 3.4.г).

По результатам внешнего осмотра замечаний не было.



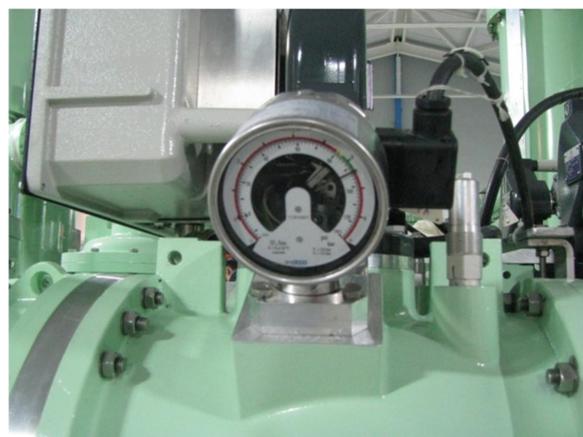
а



б



в



г

Рисунок 3.4 – Внешний вид КРУЭ (а), информационная табличка (б), ввод «кабель – элегаз» (в) и датчик плотности элегаза (г)

Оценка электромагнитной обстановки. Измерения выполнены переносным прибором марки «UHF-Recorder», предназначенным для регистрации электромагнитного излучения от высоковольтного оборудования в диапазоне СВЧ от 100 до 900 МГц. При измерениях интенсивности электромагнитного излучения КРУЭ 220 кВ в целом и его отдельных ячеек и кабельных вводов, дефектов не выявлено. Единичные редко повторяющиеся импульсные сигналы в диапазоне частот (150 – 380) МГц, скорее всего, были связаны с процессами перезарядки металлических частиц (ы) (рисунок 3.5).

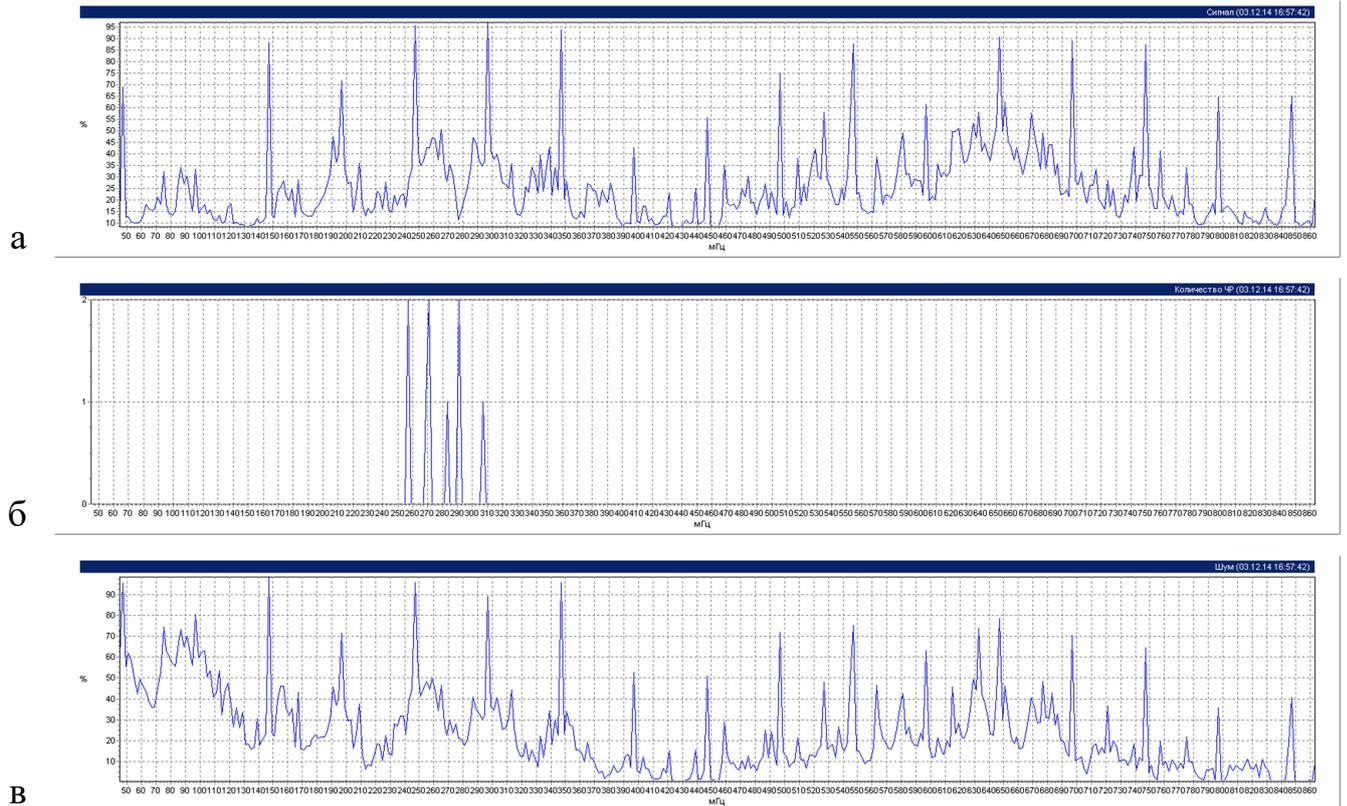


Рисунок 3.5 – Общий фон электромагнитного излучения в помещении КРУЭ 220 кВ, измеренный в течение 10 минут:
 а – общий спектр; б – число и спектр импульсных сигналов;
 в – спектр фоновых помех

Измерение напряжённости магнитного поля проводились для оценки условий нахождения возле оборудования персонала с точки зрения соблюдения требований охраны труда, согласно [127].

Измерения проводились на кабельном полуэтаже, прибором – ИНМП с антенной НЗ-50. Напряжённость магнитного поля в разных позициях датчика изменялась от 3 А/м (уровень 1,8 м от пола в проходе на расстоянии 1 м от ближнего кабеля до 136 А/м на поверхности оболочки кабеля.

Максимальная величина напряжённости магнитного поля превышает санитарную норму 80 А/м согласно РД ЭО 0410-02 (приложение Д) и СанПиН 2.2.4.1191-03 лишь вблизи поверхности оболочек кабеля. Время работы персонала непосредственно на кабелях необходимо ограничить 4 часами в смену. Работы на расстоянии 1 м и более от кабелей можно проводить без ограничений времени.

Тепловизионное обследование с целью контроля распределения температуры по поверхности КРУЭ и кабельных вводов. Общие картины и места вероятных дефектов фиксировались в виде термограмм (ИК-изображение) и фотоаппаратом (рисунок 3.6). Обработка результатов проводилась с использованием методик ОРГРЭС, Flir Systems и МЭК. При обследовании и расчётах учитывались: излучательная способность объектов, расстояние до объекта обследования и токовые нагрузки оборудования.

Критерии контроля. В качестве основного нормативного документа использовался СО 34.45-52.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования».

Распределение температуры по поверхности кабеля, элементам КРУЭ, и контактными соединениям в норме.

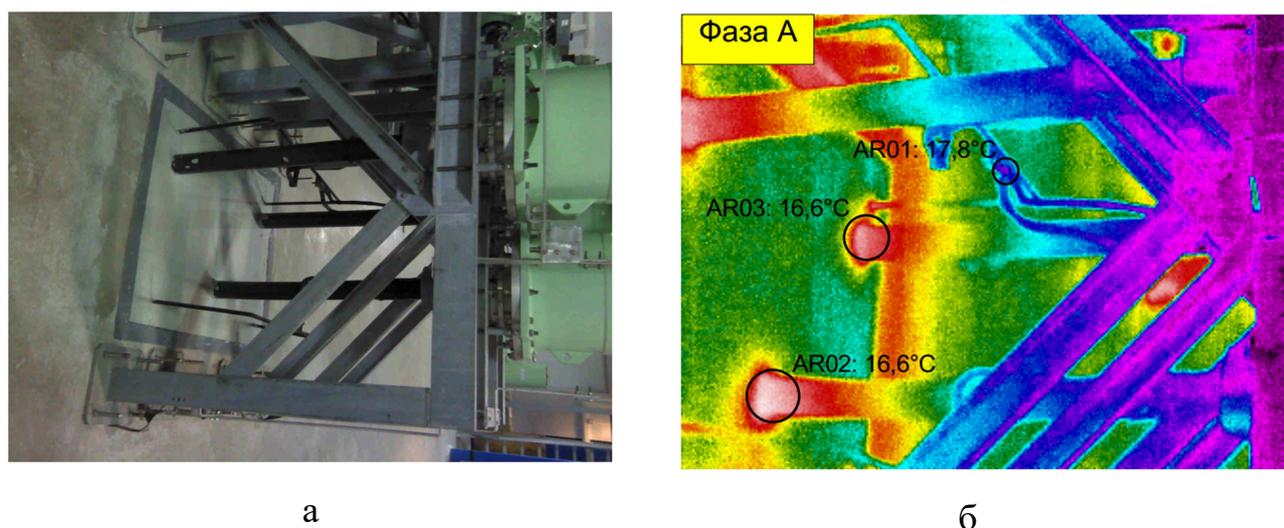


Рисунок 3.6 – Внешний вид ячейки АТ-2 КРУЭ 220 кВ фазы «А» (а) и её термограмма (б): Макс. t в обл. AR01: 17,8°C; Макс. t в обл. AR02: 16,6°C; Макс. t в обл. AR03: 16,6°C

3.2 Применяемые измерительные приборы и датчики

Для регистрации сигналов использовался цифровой осциллограф ТЕКТРОНИХ DPO3014. Осциллограф имеет 4 канала, верхняя частота диапазона измерений – 100 МГц, частота дискретизации – 2,5 Гвыборок/с, ёмкость памяти – до 5 М на каждый канал.

В качестве датчиков сигналов использовались высокочастотные трансформаторы тока RFCT-4 производства компании «Димрус» (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Внешний вид датчика RFCT-4

Датчик имеет разъемную конструкцию с большим внутренним диаметром (68 мм). С целью обеспечения безопасности измерительных цепей во вторичную обмотку датчика включены ограничители перенапряжений. При монтаже на элементах оборудования, по которым протекает ток промышленной частоты, соединять половинки датчика нужно было с изолирующей прокладкой толщиной до 3 мм, чтобы избежать насыщения сердечника. Чем больше был ток промышленной частоты, который протекал по элементу конструкции оборудования, на котором смонтирован датчик, тем больше должен был быть немагнитный и не проводящий зазор сердечника.

3.3 Выполненные измерения и анализ полученных сигналов

На КРУЭ 220 кВ были выполнены следующие измерения:

а) Синхронное измерение сигналов с различных точек подключения на вводе «кабель – элегаз» для определения наилучшего места подключения датчиков.

б) Синхронное измерение сигналов на заземляющих поводках конусов вводов «кабель-элегаз» по трём фазам. Измерения производились поочерёдно для каждого ввода.

в) Синхронное измерение сигналов на заземлении конусов всех вводов «кабель-элегаз», по отдельности для каждой фазы.

Синхронное измерение сигналов с различных точек подключения датчиков на кабельном вводе. Каждый кабельный ввод имеет три возможных точки подключения ВЧТТ (рисунок 3.8), в которых и были проведены синхронные регистрации сигналов:

- ~ Заземление экрана кабеля;
- ~ Заземление конуса кабельного ввода;
- ~ Заземление тест-вывода кабельного ввода.

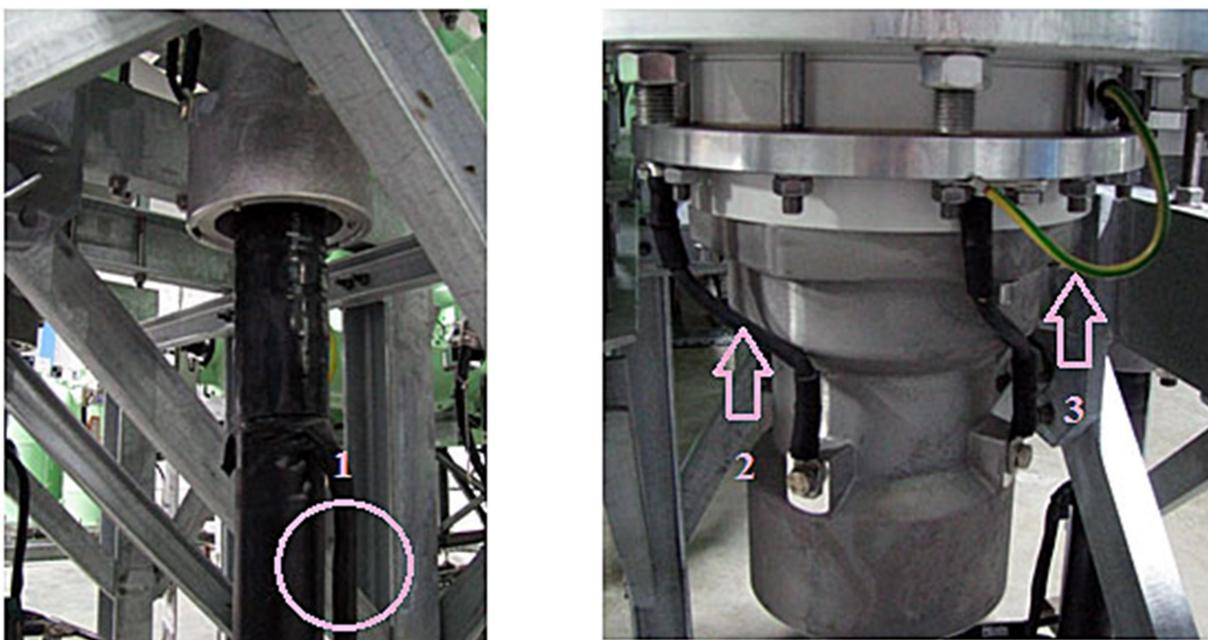


Рисунок 3.8 – Места установки ВЧТТ на кабельном вводе:

1 – заземляющий поводок экрана кабеля; 2 – заземляющий поводок конуса кабельного ввода; 3 – заземление тест-вывода кабельного ввода

На рисунке 3.9 приведены осциллограммы сигналов, измеренные на фазе «А» кабельного ввода от автотрансформатора АТ-2.

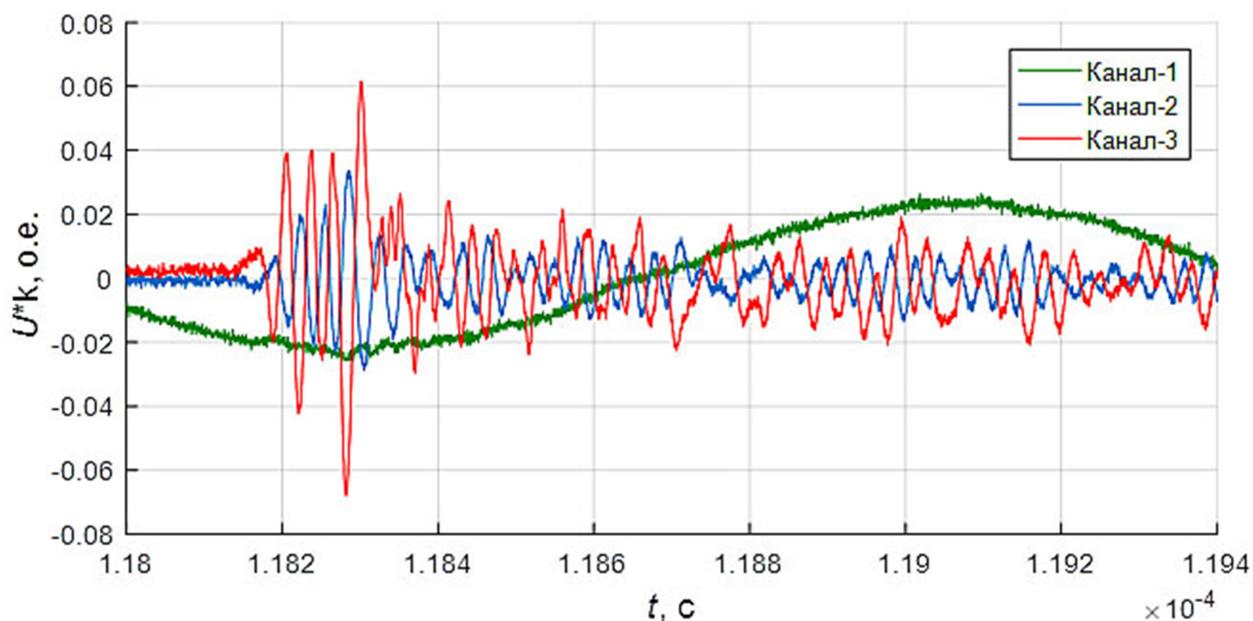


Рисунок 3.9 – Осциллограмма сигналов, зарегистрированных на кабельном вводе АТ-2, ф. «А», КРУЭ 220 кВ:

1 – на заземлении экрана кабеля ($k=50$ В), 2 – на заземлении конуса кабельного ввода ($k=1$ В); 3– на заземлении тест-вывода кабельного ввода ($k = 1$ В); k – коэффициент перехода от значения в относительных единицах к значению в Вольтах

Аналогичные сигналы были получены и на других фазах всех кабельных вводов КРУЭ. Анализ осциллограмм показал, что в сигнале 1, полученном с датчика заземления экрана кабеля, присутствует ярко выраженный синусоидальный сигнал амплитудой до одного вольта. Для точного определения основной частоты данного сигнала был выполнен его спектральный анализ, с помощью дискретного преобразование Фурье в пакете MATLAB. В результате получена гистограмма исходного спектра частот (рисунок 3.10).

В амплитудно-частотном спектре выделяется гармоника с частотой 610 кГц. Как выяснилось позже, она соответствует несущей частоте ВЧ-связи по проводам питающих КРУЭ ЛЭП 220 кВ. Значительная амплитуда прорывающегося ВЧ сигнала 1,25 В скрывает маленькие сигналы от ЧР и не позволяет выполнить качественные измерения в данной точке без применения дополнительных фильтров.

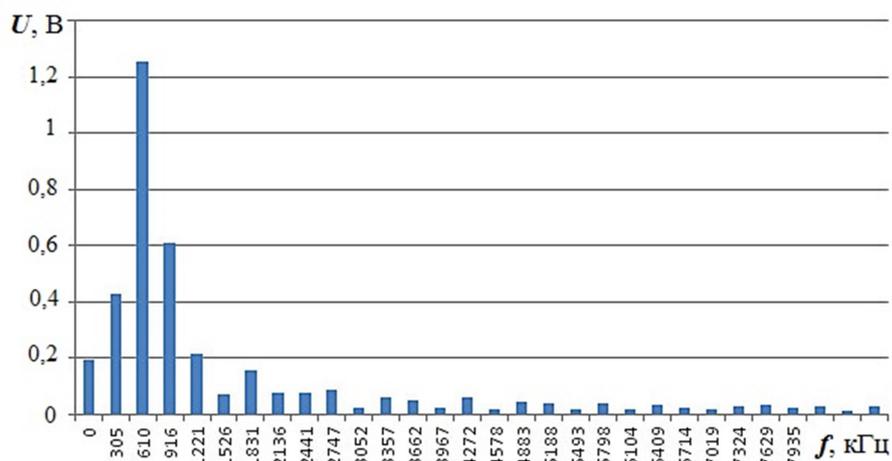


Рисунок 3.10 – Спектр частот сигнала, зарегистрированного на заземлении экрана кабеля связи с АТ-2 ф., «А»

Таким образом, подключение датчиков ЧР в данной точке для проведения диагностирования было признано не целесообразным, по крайней мере, с данным типом датчика и без дополнительной фильтрации его выходных сигналов.

Рассмотрим два других сигнала. На рисунке 3.11 приведены фрагменты осциллограмм с сигналами от датчика с заземления конуса кабельного ввода и заземления тест-вывода кабельного ввода.

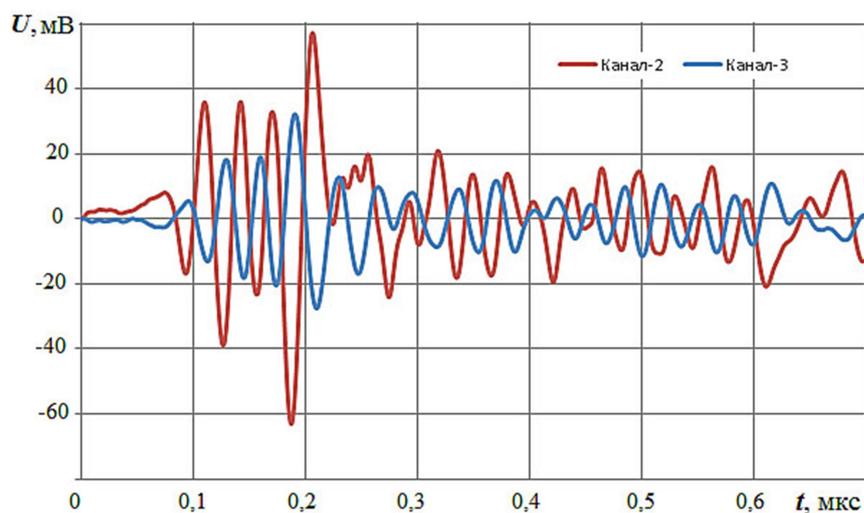


Рисунок 3.11 – Осциллограммы сигналов, зарегистрированных в вводе «кабель-элегаз» связи с АТ-2, ф. «А»:

2 – заземление конуса; 3 – заземление тест-вывода ввода

Сигналы имеют схожую форму, однако кривая соответствующая заземлению диагностического разъёма (канал 3) имеет запаздывание и меньшую амплитуду сигнала. Обработка результатов показала, что запаздывание прихода сигнала составляет 19 нс, а разница в амплитуде сигнала практически кратна двум. Данный факт говорит о том, что последняя обкладка ввода «кабель-элегаз», к которой подключен поводок заземления, вносит существенные искажения в регистрируемый сигнал. Таким образом, наиболее подходящим местом подключения датчиков регистрации ЧР (ВЧТТ) в КРУЭ были признаны заземляющие поводки конусов вводов «кабель-элегаз».

Синхронное измерение сигналов на заземлении конусов трёх фаз вводов «кабель-элегаз». Данная серия измерений проведена для определения фаз КРУЭ, требующих пристального внимания при проведении дальнейшего диагностирования. Измерения проводились поочерёдно на вводах «кабель – элегаз» каждой фазы (рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Места установки датчиков ЧР на кабельном вводе для проведения синхронных измерений по трём фазам

Поочерёдно для каждого из четырёх кабельных трёхфазных вводов были синхронно записаны осциллограммы сигналов с трёх фаз.

Анализ полученных осциллограмм выявил на фазе «А», кабельного ввода от автотрансформатора АТ-1 сигналы симметричные по полярности, с амплитудой первого пика $U_m = 0,35$ В (рисунки 3.13,а и 3.13,б).

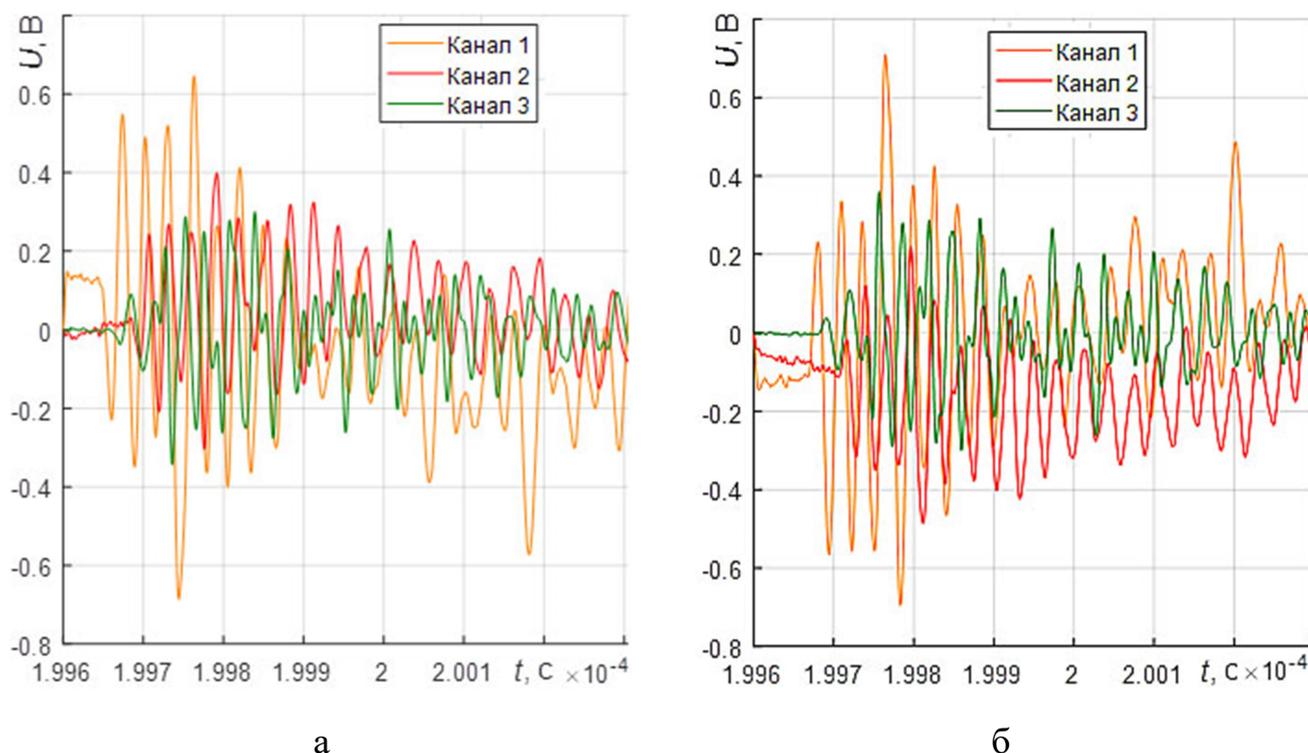


Рисунок 3.13 – Осциллограммы сигналов от импульсных токов в цепях заземления конусов вводов «кабель-элегаз»: 1 – фаза «А»; 2 – фаза «В»; 3 – фаза «С»

Как было отмечено в главе 2, симметричный по полярности сигнал является одним из признаков внутренних ЧР. Однако при проведении измерения на стыке двух типов электроэнергетического оборудования (КРУЭ и кабельной вставки) нельзя однозначно сказать, где находится источник ЧР. Возможно, локализовать только фазу, в которой он находится. Для определения места расположения источника сигнала, необходимо использовать распределённую вдоль объекта систему датчиков. Минимально необходимое количество датчиков для построения та-

кой системы равно двум, однако в таком случае для локации места повреждения потребуется проведение серии измерений с последовательным изменением положения одного из датчиков на диагностируемом объекте.

Синхронное измерение сигналов на заземлении конусов всех вводов «кабель-элегаз», по отдельности для каждой фазы. Данный вид измерений был проведён для анализа процессов протекающих внутри каждой фазы КРУЭ.

Датчики были подключены к заземлению конусов всех кабельных вводов. Измерения проводились поочерёдно для каждой фазы КРУЭ. На осциллограммах, полученных для фазы «А», был зафиксирован сигнал симметричный по полярности, последовательно возникающий на всех каналах по мере распространения сигнала в КРУЭ (рисунок 3.14).

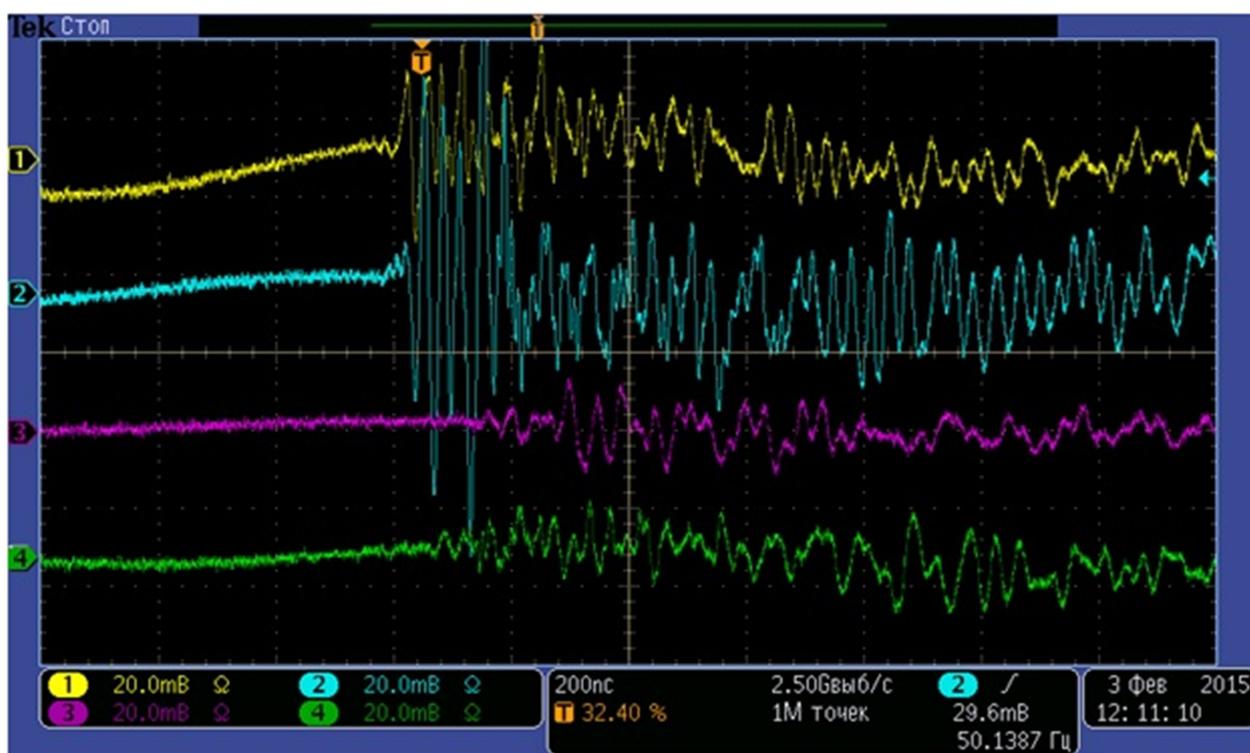


Рисунок 3.14 – Осциллограммы сигналов с фаз «А», полученные с датчиков заземления конусов всех вводов «кабель – элегаз»:

1 – ВЛ-236; 2 – АТ-2; 3 – ВЛ-236; 4 – АТ-1

Форма полученных сигналов аналогична сигналам, зарегистрированным на фазе «А» при проведении измерений по трём фазам каждого кабельного ввода. Для подтверждения соответствия зарегистрированных сигналов сигналу, представленному на рисунке 3.13, было выполнено вейвлет – преобразование. Особенностью вейвлет – преобразования является определение не только спектра частотных составляющих сигнала, но и времени их возникновения. В качестве базисного был использован вейвлет Морле. Это комплексный вейвлет наиболее широко используемый для цифровой обработки сигналов, так как он хорошо локализован и во временной и в частотной областях сигнала (рисунок 3.15).

$$\psi(t) = \exp(iat - \frac{t^2}{2}) \quad (3.1)$$

где a - значение масштабирующей переменной. Вещественная и мнимая части данного вейвлета $\psi(t)$ – это амплитудно-модулированные колебания.



Рисунок 3.15 – Вейвлет Морле

Поскольку операция преобразования сигнала, осуществляется с помощью масштабирующей переменной вейвлета, это приводит к растяжению или сжатию базового вейвлета в a раз. Следовательно, после данной операции частота центрального всплеска вейвлета также изменяется в равное число раз. Поэтому в основе алгоритма пересчета масштабирующей переменной, реализованного в пакете MATLAB, лежит процедура определения центральной частоты вейвлета, значение которой равно частоте гармоники, наилучшим образом аппроксимирующей его центральный всплеск. Формула для определения частоты вейвлета:

$$f_a = \frac{f_c}{a \cdot \Delta t} \quad (3.2)$$

где f_a – псевдочастота вейвлета, Гц, Δt – шаг дискретизации, f_c – частота центрального всплеска вейвлета, Гц.

Идентификация частот гармонических составляющих заключается в определении значения масштабирующей переменной вейвлета, соответствующего локальному максимуму энергии вейвлет-спектра сигнала, а также пересчёту этого значения в частоту.

Для обоих сигналов максимальная энергия зафиксирована при коэффициенте $a = 63$ (рисунки 3.16, 3.17), что в результате даёт частоту 32,2 МГц и подтверждает идентичность источника зарегистрированных сигналов.

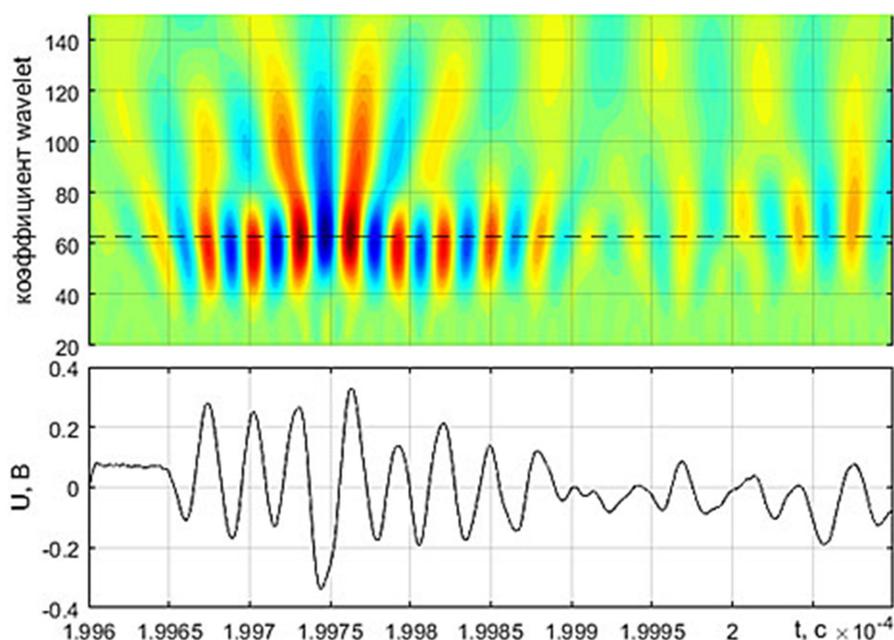


Рисунок 3.16 – Вейвлет – преобразование сигнала, полученного на фазе «А» при измерениях по трём фазам

Практически одновременный приход сигнала на первый и второй каналы, соответствующие кабельным вводам от ВЛ-236 и АТ-2, говорит о том, что источник сигнала находится внутри диагностируемого объекта. В нашем случае таким объектом является фаза «А» КРУЭ 220 кВ.

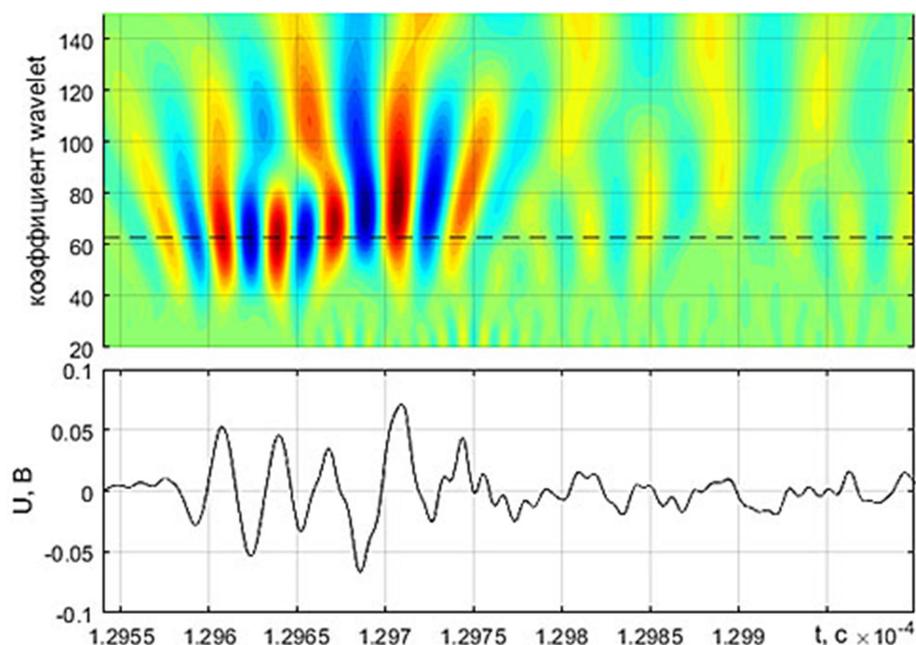


Рисунок 3.17 – Вейвлет-преобразование сигнала, полученного на втором канале при измерениях на фазе «А»

Определение места расположения источника сигнала, внутри диагностируемого объекта. Для локализации места расположения источника сигнала, необходимо определить время его прихода на каждый датчик и рассчитать расстояние, пройденное сигналом внутри фазы КРУЭ. На рисунке 3.18 приведены осциллограммы сигналов для каждого канала, очищенные от помех: постоянной составляющей, периодического сигнала несущей частоты ВЧ связи по проводам питающей ВЛ и квантования сигнала по уровню.

Вертикальной линией на графиках отмечен первый отрицательный пик, для которого были определены:

- ~ Абсолютное значение времени появления пика;
- ~ Время появления последующих пиков относительно первого;
- ~ Амплитуда пика.

Результаты измерений приведены в таблице 3.1.

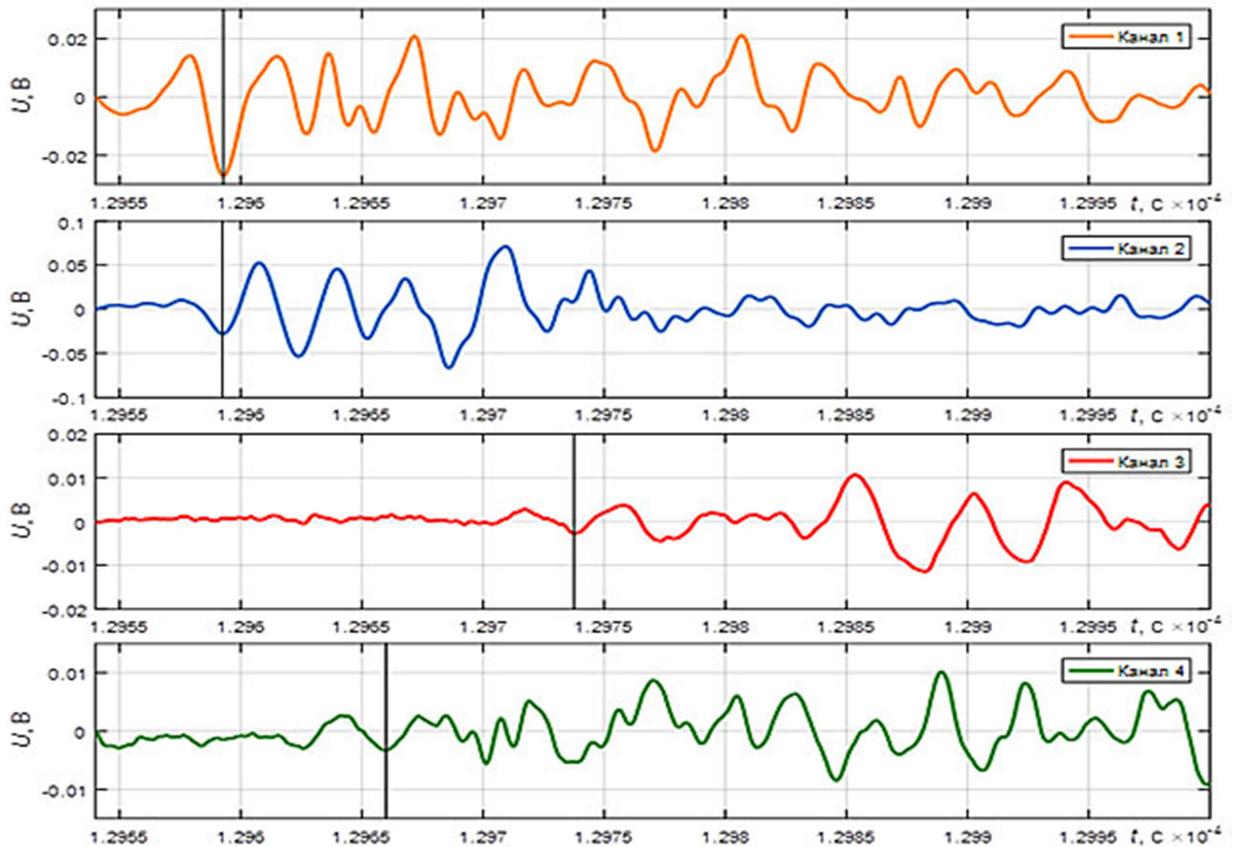


Рисунок 3.18 – Осциллограмма сигналов фазы «А» очищенных от помех:

1 – ВЛ-236; 2 – АТ-2; 3 – ВЛ-236; 4 – АТ-1

Таблица 3.1 – Параметры первого отрицательного пика

Канал	Время регистрации пика, нс	Задержка прихода сигнала относительно момента регистрации первого пика, нс	Амплитуда сигнала, мВ
1	129592,8	0,4	26,78
2	129592,4	0	28,19
3	129737,6	145,2	3,23
4	129660,0	67,6	2,76

Время пробега сигнала и расстояние от источника до датчика 2 рассчитывалось как

$$T_2 = \frac{L/c + \Delta T}{2}, \quad (3.3)$$

$$X_2 = \frac{L+c\cdot\Delta T}{2}. \quad (3.4)$$

При расчёте скорость распространения сигнала была принята равной скорости света $c=299792458$ м/с. На основе конструкторской документации определено расстояние между датчиками 1-го и 2-го каналов, на которых первично был зарегистрирован сигнал от ЧР $L=18$ м. Время пробега до датчика второго канала составило $T_2=28$ нс, этому времени пробега соответствует расстояние в 8,4 м.

На рисунке 3.19 приведена схема КРУЭ, на которой отмечен район расположения источника сигнала.

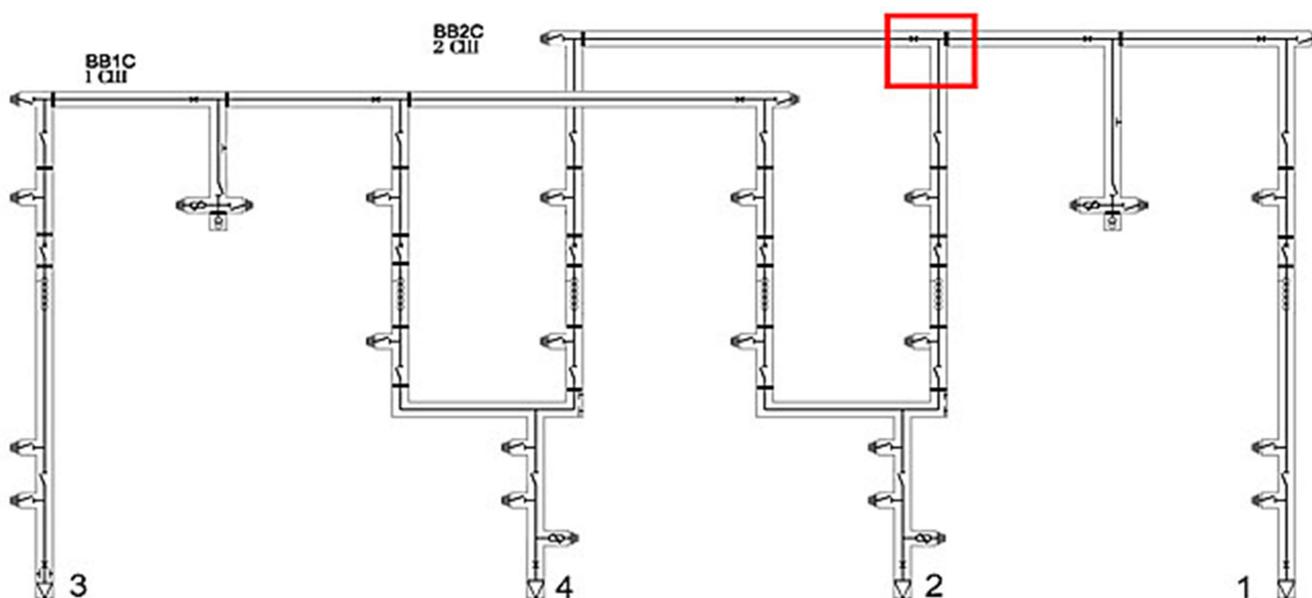


Рисунок 3.19 – Однолинейная схема КРУЭ 220 кВ: прямоугольником красного цвета выделено место расположения очага частичных разрядов

На пути следования сигнала от источника до первого и второго датчиков, расположено равное количество элементов оказывающих влияние на затухание сигнала: опорных изоляторов – 5, Т-образных соединений токопровода – 1. Таким образом, практически равное значение амплитуды зарегистрированных на первом и втором канале сигналов подтверждает выполненный расчёт места расположения источника сигналов.

На указанном участке располагаются: Т-образное соединение сегментов КРУЭ, опорный изолятор, съёмная перемычка для соединения токоведущих жил, в непосредственной близости расположен разъединитель. Каждый из этих элементов может являться прямым или косвенным источником частичных разрядов, однако нельзя исключать и другие источник ЧР.

3.4 Определение типа дефекта и степени его опасности

Каждый тип дефекта вызывающий частичные разряды имеет характерный профиль осциллограммы. Таким образом, сопоставив осциллограмму зарегистрированного сигнала с профилями сигналов от различных дефектов, полученных в лабораторных условиях можно с высокой точностью определить тип дефекта.

В [94, 126] были получены осциллограммы соответствующие различным моделям дефектов:

- ~ игольчатый электрод под потенциалом – заземлённый плоский электрод;
- ~ плоский электрод под потенциалом – заземлённый игольчатый электрод;
- ~ игольчатый электрод под потенциалом – заземлённый плоский электрод, диэлектрические частицы в разрядном промежутке;
- ~ игольчатый электрод под потенциалом – металлические частицы на диэлектрической подложке;
- ~ игольчатый электрод под потенциалом – металлические частицы на заземлённой поверхности.

Наиболее точно зарегистрированному сигналу (рисунок 3.20) по амплитуде и форме, соответствует осциллограмма, полученная для модели дефекта «выступ на токопроводе – оболочка КРУЭ», комбинированный с диэлектрическими частицами в разрядном промежутке (рисунок 3.21). Причиной появления выступа на токопроводе может являться некачественная обработка поверхности токопровода при производстве или повреждение, полученное при монтаже КРУЭ. Диэлектрические частицы внутри герметичного отсека КРУЭ могут являться пылью попавшей внутрь при проведении монтажных работ и сконцентрированные вокруг очага повышенной напряженности электрического поля.

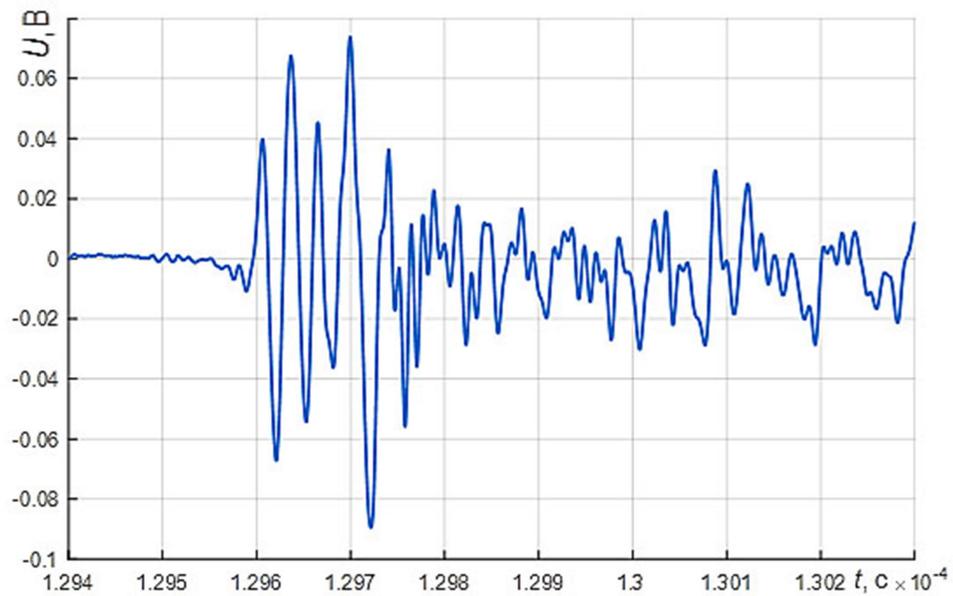


Рисунок 3.20 – Осциллограмма сигнала зарегистрированного в КРУЭ

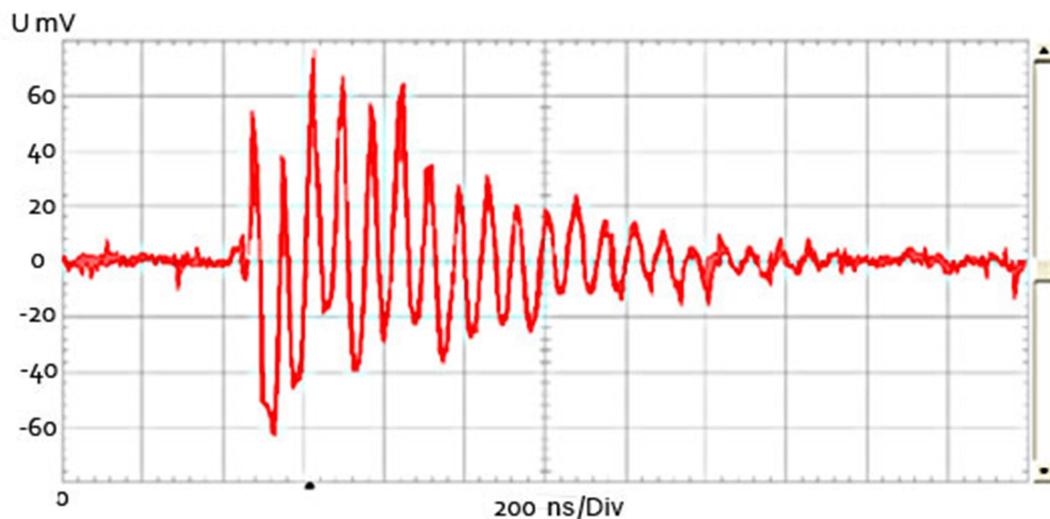


Рисунок 3.21 – Осциллограмма сигнала – образ дефекта типа «выступ на токопроводе – оболочка КРУЭ» плюс диэлектрические частицы в разрядном промежутке

Рассчитанный по осциллограмме кажущийся заряд ЧР составляет 4,98 пКл.
 На основе проведённых измерений можно сделать следующие выводы:

~ Источником ЧР является незначительный выступ на токопроводе, возможно присутствие свободных диэлектрических частицы в разрядном промежутке.

~ Кажущийся заряд ЧР не превышает 5 пКл, в соответствии с [125] не превышает допустимого для оборудования уровня, соответственно диагностированный дефект не представляет опасности для оборудования.

~ Диагностируемое оборудование находится в хорошем техническом состоянии, дальнейшая эксплуатация возможна без ограничений.

3.5 Выводы по разделу

~ Анализ конструкции КРУЭ 220 кВ выявил конструктивные и административные проблемы, не позволяющие применить накладные и встроенные электромагнитные датчики ЧР при проведении диагностики.

~ Установлено, что ВЧ связь, используемая на примыкающих воздушных линиях, является существенным источником помех при регистрации сигналов ЧР. В связи с этим при проведении диагностики требуется, тщательный выбор места подключения датчиков или использование высокочастотных фильтров.

~ На практике проверена возможность применения разработанной методики оперативной регистрации частичных разрядов в КРУЭ.

4 ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВВОДАХ «ВОЗДУХ – ЭЛЕГАЗ»

Настоящая глава посвящена проблемам вводов высокого напряжения с RIP-изоляцией (RIP – Resin Impregnated Paper), технологические отказы которых имели место в силовых трансформаторах 110 – 500 кВ в период с 2009 и 2010 гг. Указанный тип твёрдой изоляции вводов наиболее перспективен для применения в КРУЭ, поэтому представляло интерес разобраться в возможных причинах отказов изоляции. В ходе исследований проведены экспериментальные оценки пористости материала пропитки и оценки напряжённостей электрического поля на уравнивательных обкладках, измерены характерные напряжённости и величины кажущегося заряда в образце изоляции ввода 110 кВ. Основные результаты исследований опубликованы в [128 – 130].

4.1 Конструктивные особенности воздушных вводов

По конструктивному исполнению внутренней изоляции высоковольтные вводы с RIP-изоляцией относятся к герметичным вводам конденсаторного типа и имеют основную изоляцию в виде изоляционного остова с проводящими обкладками (см. рисунок 2.5). Расположение уравнивательных обкладок обеспечивает оптимальное распределение электрического поля как в радиальном (по толщине изоляции), так и в аксиальном (по концам ввода относительно заземлённой втулки) направлениях. Основная RIP изоляция высоковольтных вводов – крепированная электроизоляционная бумага, пропитанная эпоксидным компаундом. В качестве материала обкладок применяется преимущественно металлическая фольга, наложенная непосредственно на поверхность бумаги.

В промышленном масштабе освоено производство вводов на классы напряжения (110 – 550) кВ [131]. Основные преимущества вводов с RIP-изоляцией:

- ~ любой угол установки – от горизонтального до вертикального
- ~ низкие диэлектрические потери, менее 0,5 %;
- ~ низкая интенсивность ЧР (менее 5 пКл);

- ~ высокая механическая и термическая стойкость;
- ~ взрывобезопасность и экологическая безопасность.

К недостаткам вводов с RIP-изоляцией можно отнести:

- ~ отсутствие эффекта «самозалечивания» мелких дефектов;
- ~ высокие требования к технологии, т.к. некачественное изготовление приводит к появлению полостей, механических напряжений и микротрещин;
- ~ низкая величина C_2 с длинными проводами до шкафа КИВ увеличивает риск повреждения изоляции тест-вывода [132].

Несмотря на совершенствование технологии изготовления надёжность вводов с RIP изоляцией, особенно высших классов напряжения, оставляет желать лучшего. Обычно в условиях эксплуатации повреждается изоляционный остов ввода, а сквозному пробое предшествует пробой одного из слоёв изоляции между уравнительными обкладками. Наиболее непонятны причины, по которым пробой слоя изоляции возникает на некотором расстоянии от центральной части ввода. Можно предположить, что эти повреждения могут инициироваться дефектами в виде воздушных пор или трещин, другими видами дефектов или резонансными перенапряжениями высокой частоты. Наличие дефектов может быть вызвано нарушениями технологического процесса и должно выявляться в приёмосдаточных испытаниях.

Возникновение свободных колебаний с резонансной частотой имеет место при коммутационных процессах. Как во всяком объекте с реактивными элементами, свободные колебания с резонансной частотой имеют право быть. Очевидно, что более опасными для изоляции являются резонансы напряжения. Важно, однако, понимать, на каких частотах они могут возникнуть, и какой источник напряжения может быть возбудителем свободных колебаний резонансной частоты. В конечном счёте, необходимо понять какие распределения напряжения поперёк (по слоям) и вдоль (по высоте), могут возникнуть в изоляции ввода. Согласно исследованиям авторов [133] резонансные частоты составляют 8 МГц для вводов 220 кВ. Столь высокие частоты могут генерироваться при коммутациях внутри КРУЭ,

где, по-видимому, и надо ожидать влияния этих процессов на надёжность эксплуатации вводов.

Несколько более ясными выглядят причины повреждений изоляции в центральной части ввода, особенно, в области контактного узла тест-вывода с последней обкладкой (рисунок 4.1,а).



а

б

Рисунок 4.1 – Разрез RIP изоляции ввода 500 кВ с каналом пробоя семи слоёв изоляции (а) и повреждение изоляции незаземлённого тест-вывода (б)

По имеющейся в России статистике они возникают в 70 % случаев всех повреждений. Основными причинами повреждений в этой части конструкции ввода являются преимущественно некачественное заземление, неэффективная защита изоляции от перенапряжений и высокое переходное сопротивление контактного соединения тест-вывода с последней обкладкой. В случае плохого заземления первой повреждается изоляционная конструкция тест-вывода (рисунок 4.1,б). Коммутационные перенапряжения на тест-выводе могут возникать при недостаточной эффективности защитных устройств (конденсаторов, варисторов, разрядников) или их удалённом расположении от тест-вывода [132]. Высокое переходное сопротивление наблюдалось во вводах с поджимной конструкцией контак-

ного соединения (применялось до 2011 г.) и отсутствует при пайке к последней обкладке провода, соединяющего её с тест-выводом (применяется с 2011 г.).

4.2 Исследование структуры RIP изоляции капиллярными методами

В основе исследований пористости структуры лежат закономерности поведения смачивающей и не смачивающей жидкостей в капиллярах. Жидкости, смачивающие материал, в котором имеется капилляр, будут в нём подниматься (рисунок 4.2,а), а не смачивающие – опускаться (рисунок 4.2,б).

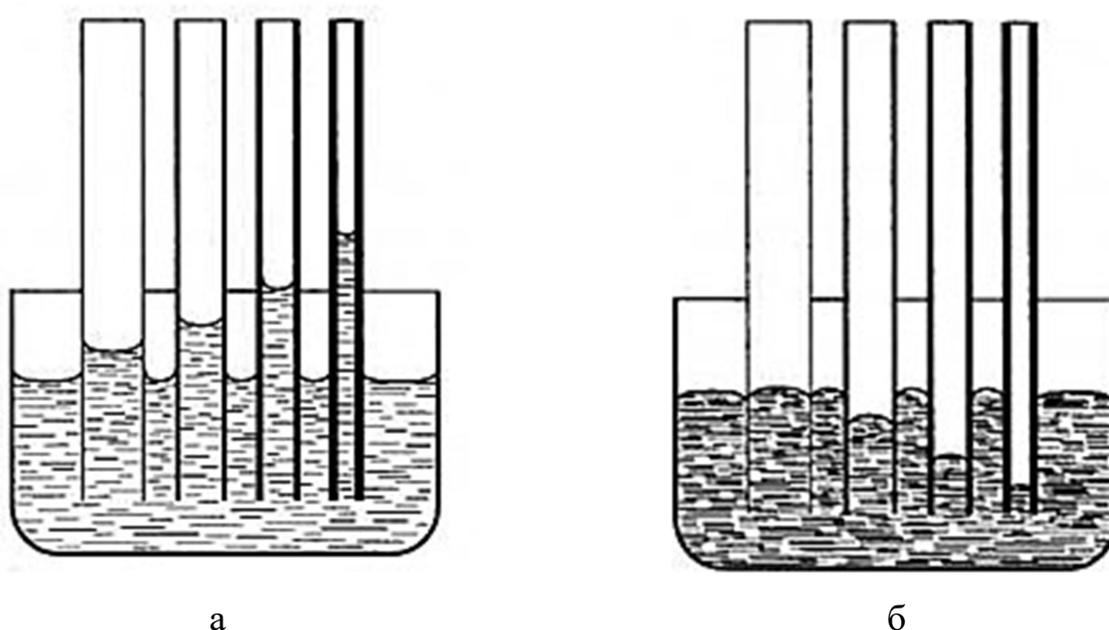


Рисунок 4.2 – Поведение смачивающей (а) и несмачивающей (б) жидкостей в капиллярах разного диаметра

Кроме того, высота подъёма (опускания) жидкости зависит от толщины трубки: чем тоньше капилляр, тем больше высота поднятия (опускания) жидкости. Исследования проводились на образцах RIP изоляции толщиной 10 ± 1 мм, отрезанных алмазными дисками от остовов вводов класса напряжения 110 кВ российского производства с большими предосторожностями (рисунок 4.3).

Проникновение красящей жидкости. Цель данного опыта: установить наличие сквозных капилляров. Опыт проводился по методике п.9.4.1 стандарта МЭК 62217 [134]. Как правило, в каждом образце имелся один сквозной капилляр (ри-

сунок 4.3,б), а в некоторых образцах их было несколько. Высокая скорость проникновения красящей жидкости (около 1 мм/с) свидетельствовала о малых диаметрах капилляров.

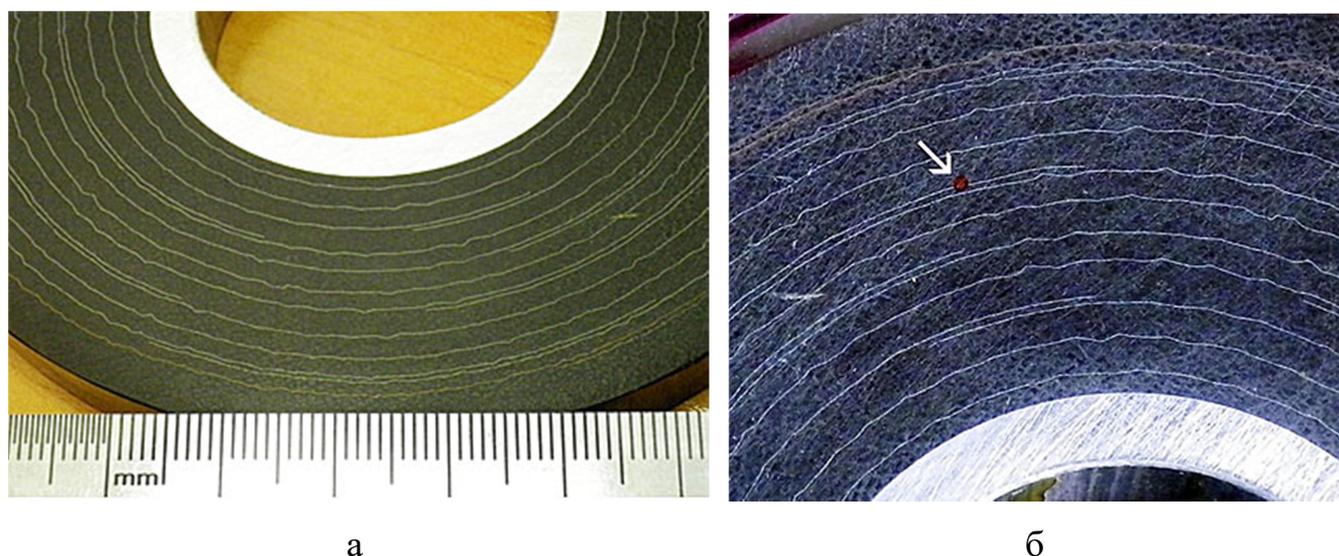


Рисунок 4.3 – Внешний вид образца RIP изоляции (а) и проникновение красящей жидкости (б) по сквозному капилляру (показан стрелкой)

Ртутная порометрия основана на нагнетании ртути (несмачивающая жидкость) в образец, из которого предварительно откачан воздух. По мере того, как заполняются самые крупные, затем менее крупные капилляры и поры, требуется все большее и большее давление, чтобы протолкнуть в них ртуть. Количественно связь соотношения размеров каналов в образце выражается в изменении объёмов ртути, входящей в образец при последовательно увеличивающихся давлениях. Таким образом, ртутная порометрия является прямым методом измерения объёма пор образца и косвенным методом определения эквивалентного радиуса пор, так как базируется на модели цилиндрических капилляров. Поэтому получаемые результаты справедливы только в пределах применимости цилиндрической модели для описания пористой структуры.

Метод основан на уравнении Уошборна, который первым применил вдавливание ртути для определения диаметра пор D

$$D = \frac{-4\sigma \cdot \cos\theta}{\Delta P}, \quad (4.1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения ртути (485дин/см), θ – краевой угол смачивания (130 ÷ 145 град), ΔP – избыточное давление (Па).

Этот метод позволяет получить и оценку полной удельной поверхности

$$S_{уд} = \frac{1}{\sigma \cdot \cos\theta} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta V_p, \quad (4.2)$$

где ΔV_p – приращение объёма вдавненной ртути при повышении давления от P_i до P_{i+1} .

В соответствии с принципом действия ртутная порометрия имеет принципиальный недостаток. Дело в том, что заполнение объёма пор ртутью происходит с поверхности образца, поэтому поры, находящиеся в центральной части образца, заполняются с опозданием и уже при более высоком давлении, в результате чего искажается истинное распределение пор по их диаметрам. Во избежание этого желательно, чтобы отдельные испытуемые образцы были возможно более мелкими. Нами испытывались 2 образца размером 12×6×10 мм (рисунок 4.4). Перед экспериментом они промывались спиртом и для просушки помещались в вакуум на 4 часа при температуре 100 °С.

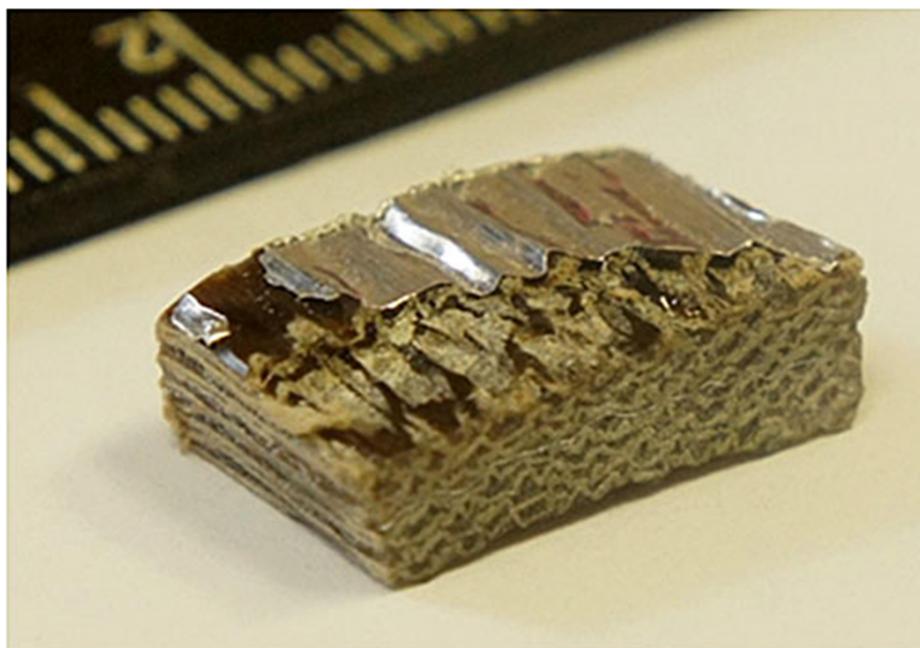


Рисунок 4.4 – Внешний вид испытуемого образца

Измерения проводились на установке «Автопор 9420» производства фирмы «Micromeritics» (США), функциональная схема которой приведена на рисунке 4.5.

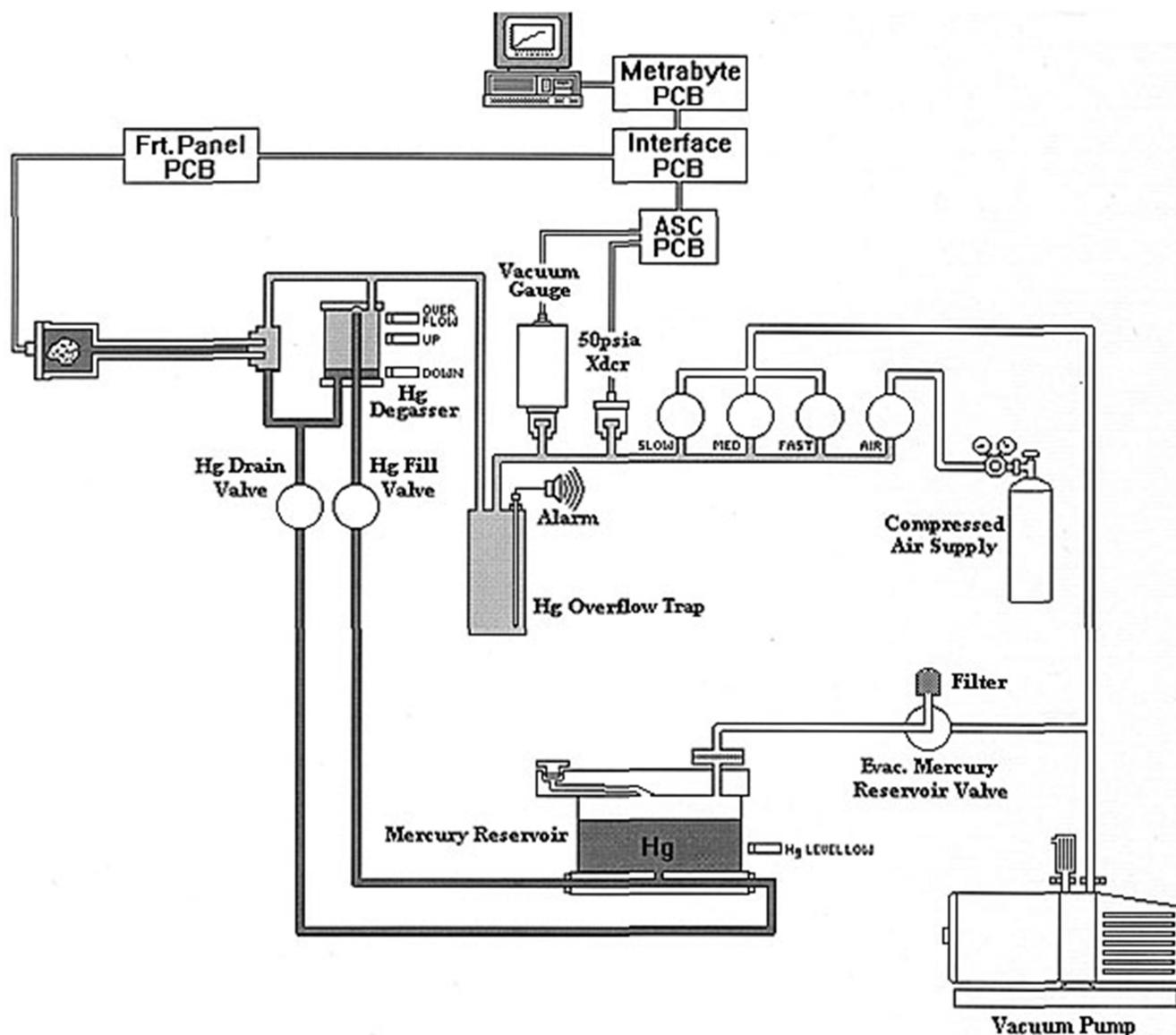


Рисунок 4.5 – Функциональная схема установки ртутной порометрии

После закладки образца установка проводила автоматическое испытание и измерения. Давление поднималось толчками, и фиксировался объём ртути, задавленной в капилляры. В математической модели обработки результатов измерений предполагается, что поры имеют форму капилляров. Поскольку ртуть – несмачивающая жидкость, то давлением преодолеваются силы поверхностного натяже-

ния. Поэтому чем меньше диаметр капилляров, тем большее давление надо создать. А количество ртути, заполнившей капилляры, определяет их объём.

Расход ртути определяется по ёмкости цилиндрического конденсатора, образованного подающей ртуть трубкой (ртуть – внутренний электрод, изоляция – стекло, внешний электрод из металла с малым температурным коэффициентом расширения).

Результаты измерений на одном из образцов приведены на рисунке 4.6, в виде дифференциального распределения капилляров по диаметрам.

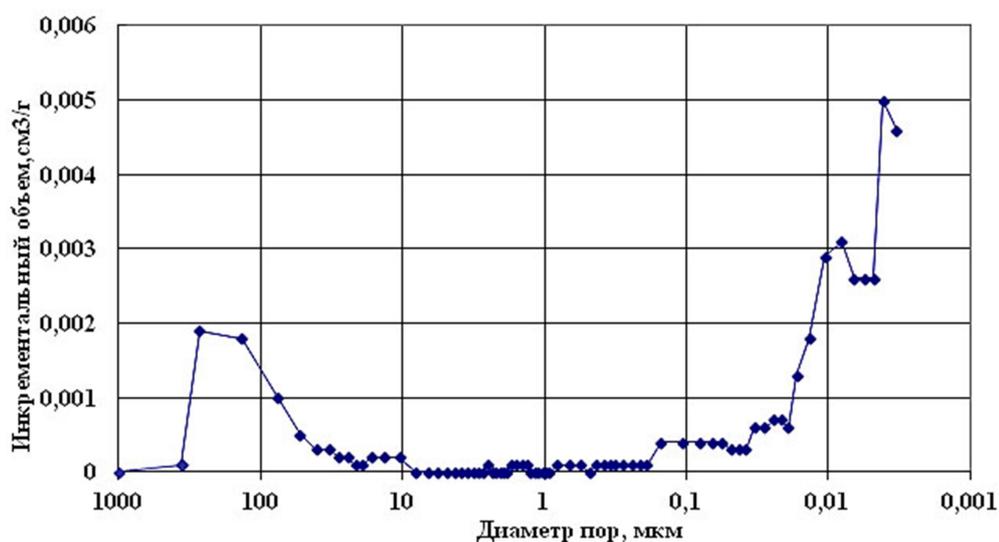


Рисунок 4.6 – Зависимость инкрементального объёма от диаметра капилляров (дифференциальное распределение)

Итоги исследований можно сформулировать следующим образом.

а. Левая часть зависимости может объясняться не только наличием капилляров с диаметрами в десятки и даже сотни микрон, но также быть следствием неровной поверхности образцов. Отслоения эпоксидной смолы от фольговых уравнивающих обкладок также могут восприниматься аппаратурой как капилляры большого диаметра.

б. Схожесть центральной и правой частей кривых, полученных на разных образцах, говорит о стабильности свойств внутренней структуры. При этом малые размеры пор, скорее всего, принадлежат крепированной бумаге. По-видимому, в

процессе изготовления изоляции они не могут пропитаться эпоксидной смолой из-за противодействия сил поверхностного натяжения. Следует заметить, что большое количество мелких капилляров приводит к большой гигроскопичности обычных материалов.

Косвенный признак отслоений просматривался на одном из образцов изоляции с практически целой фольговой обкладкой (рисунок 4.7). Очевидно, что при хорошей адгезии смолы к обкладке, она не осталась бы столь целой.



Рисунок 4.7 – Внешний вид одного из образцов изоляции ввода 110 кВ

Главное сомнение автора в результатах испытаний связано с подготовкой образцов: капилляры большого диаметра могли появиться не только в процессе некачественной пропитки, но и при резке образцов.

Диэлектрическая спектроскопия. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь бумажно-масляной изоляции позволяет оценить влагосодержание бумаги, и поэтому прочно вошла в арсенал методов профилактического контроля маслonaполненного и других видов оборудования. Применяется данная

методика и для контроля твёрдой изоляции вводов, однако о критериях контроля сведения не приведены [135].

Нами использовался прибор IDAX 300, предназначенный для диэлектрической спектроскопии бумажно-масляной изоляции [136]. Режим измерений был выбран как «Измерение основной изоляции ввода». Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты приведена на рисунке 4.8.

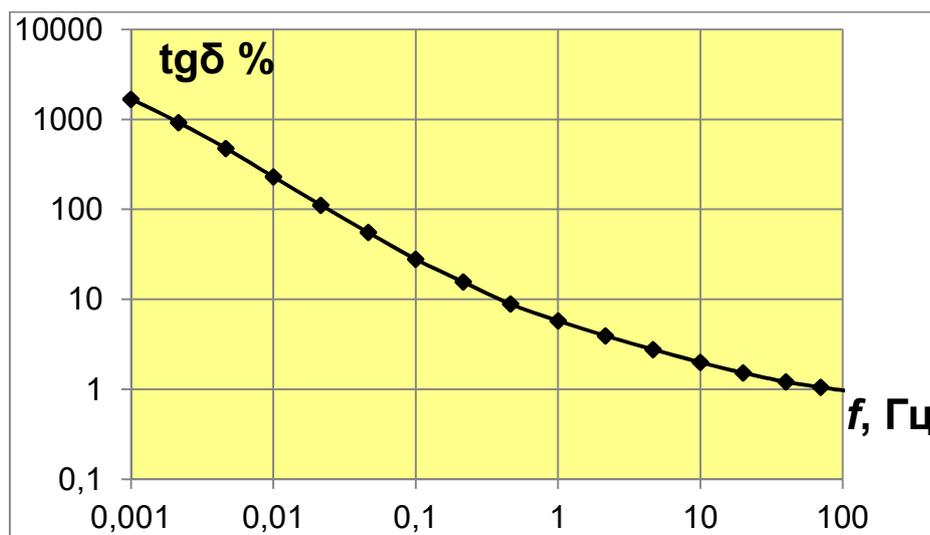


Рисунок 4.8 – Частотная зависимость диэлектрических потерь в слое RIP-изоляции

Ёмкость одного слоя изоляции, измеренная на частоте 70 Гц и напряжении 140 В составляла 118 пФ, ёмкость четырёх слоёв – 29,6 пФ.

В отсутствие математической модели про влагосодержание изоляции сказать что-то трудно. Оценка по модели бумажно-масляной изоляции, зашитой в программном обеспечении прибора, дала неправдоподобный результат - 3,7 %.

Очевидно, что эта оценка сильно завышена, но содержание влаги или другой неоднородности в изоляции просматривается и в частотной зависимости ёмкости: её величина слабо и монотонно возрастает с понижением частоты:

F , Гц	70	40	20	10	4,64	2,15
C , пФ	118,3	118,7	119,3	120	121,1	122,6

Измерение характеристик частичных разрядов. Целью экспериментального исследования была оценка напряжённости и кажущегося заряда ЧР в образце RIP изоляции. Были проведены две серии экспериментов с двумя образцами изоляции. В первой серии электрическое поле возбуждалось в коаксиальной электродной системе (рисунок 4.9), обеспечивающей контролируемые (расчётом) и близкие друг к другу распределения электрического поля внутри и вне образца.



Рисунок 4.9 – Электродная система с образцом RIP изоляции

Испытаниям подвергался тот же образец изоляции, что и в испытаниях на проникновение раствора фуксина. Для исключения разрядов по поверхности испытания проводились в трансформаторном масле.

Схема испытательной установки, приведена на рисунке 4.10.

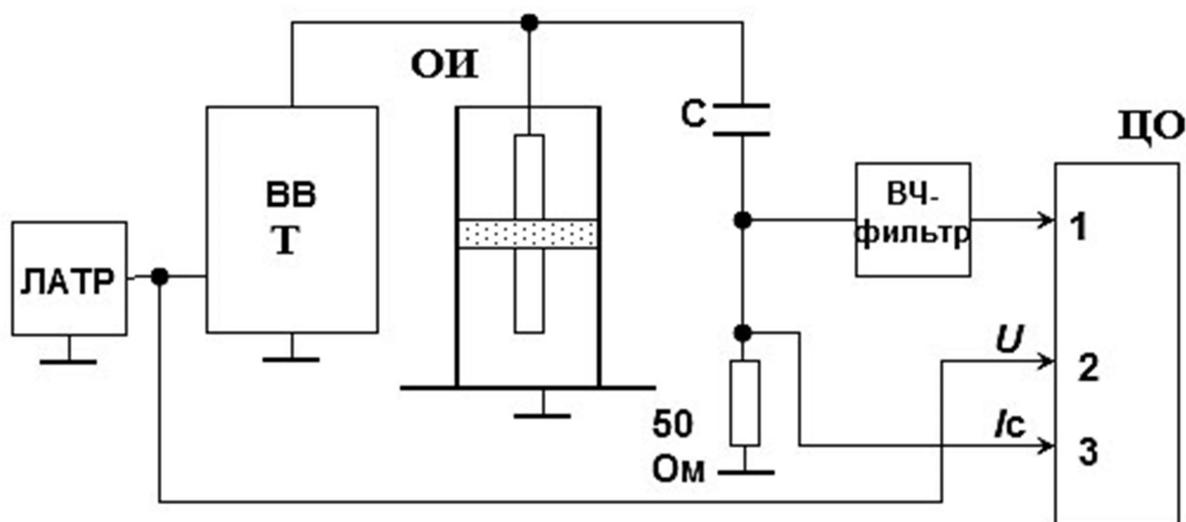


Рисунок 4.10 – Схема испытаний коаксиальной ячейки:

ЛАТР – автотрансформатор, ВВТ – повышающий трансформатор, ОИ – объект испытания, С – конденсатор связи, ЦО – цифровой осциллограф

Подъём напряжения осуществлялся ступенями по 5 кВ вплоть до 40 кВ, что соответствовало верхнему пределу установки по собственным ЧР. В испытуемом образце ЧР не были зарегистрированы, хотя при напряжении 40 кВ расчётная напряжённость электрического поля на первых трёх слоях изоляции (счёт от внутреннего электрода) была не меньше рабочей, т.е. 4 кВ/мм.

Отсутствие ЧР может быть объяснено двумя обстоятельствами:

- ~ отсутствием пор и капилляров с размерами, соответствующими зажиганию ЧР при этой напряжённости поля;
- ~ поры были открытыми и заполнились трансформаторным маслом, вследствие чего их электрическая прочность резко увеличилась.

Во второй серии испытывались отдельные слои изоляции второго образца. Схема приложения напряжения приведена на рисунке 4.11. Игольчатые электроды касались торцевых поверхностей обкладок, обеспечивая электрический контакт с ними. Для исключения попадания масла в открытые капилляры поверхности образца были покрыты тонким слоем герметика.

Типичные осциллограммы ЧР в разных временных масштабах приведены на рисунках 4.12 и 4.13.

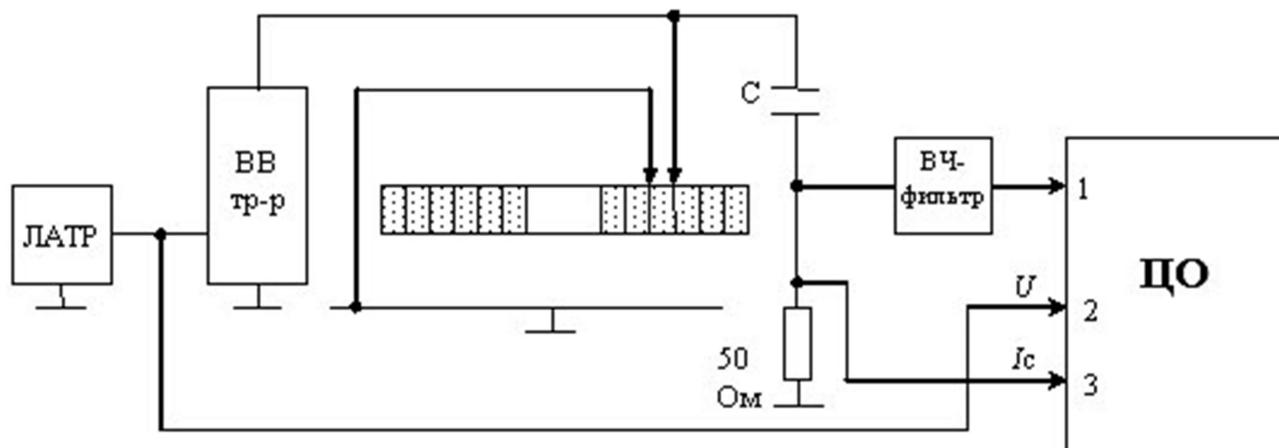


Рисунок 4.11 – Схема испытаний отдельных слоёв RIP-изоляции

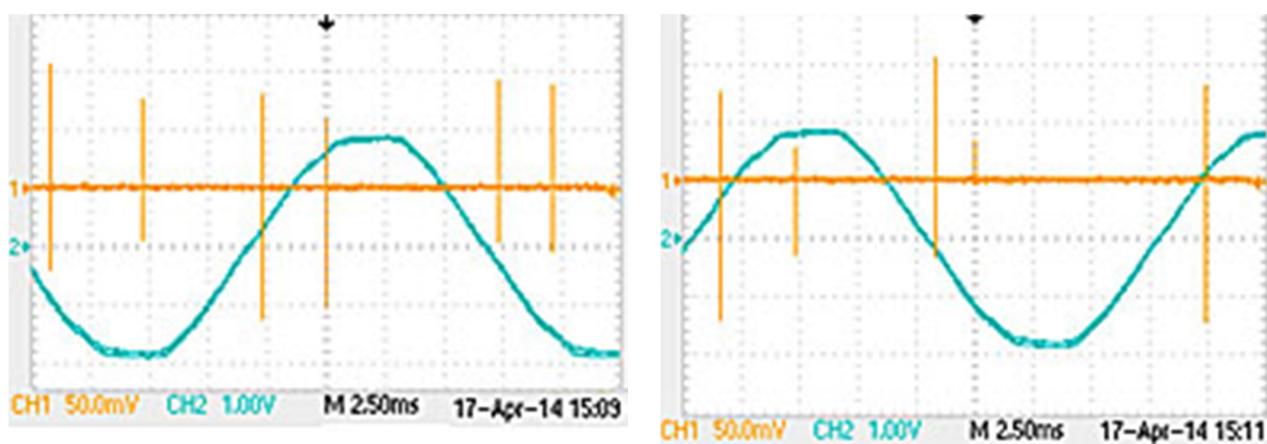


Рисунок 4.12 – Фазовое расположение сигналов частичных разрядов в периоде высокого напряжения 7,5 кВ

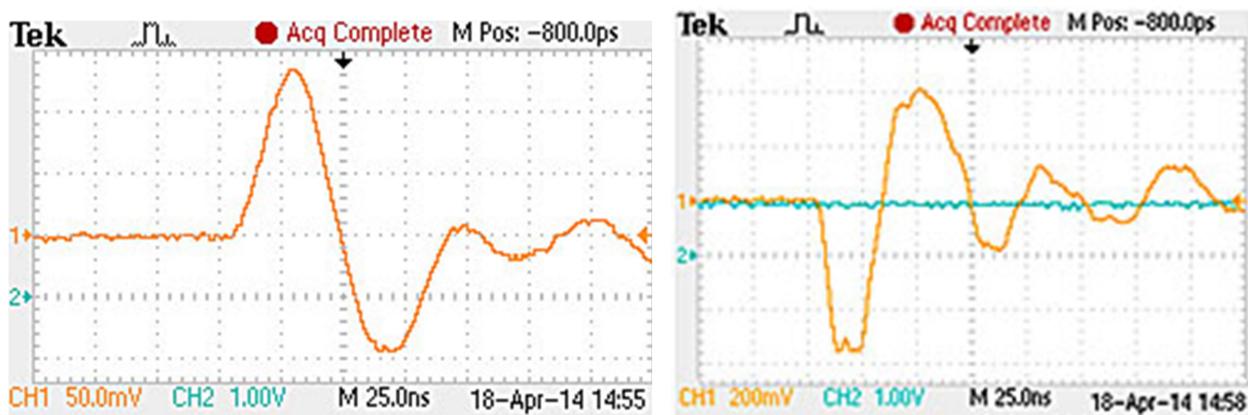


Рисунок 4.13 – Осциллограммы сигналов ЧР в слое изоляции между 3-й и 4-й обкладками при напряжении 8 кВ

Сводные данные по характеристикам ЧР сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний образца RIP- изоляции

Номер слоя	Напряжение начала /уровень ЧР, кВ/пКл	Уровень ЧР, пКл, при напряжении, кВ _{эфф}				
		7,0	7,5	8,0	8,5	9,5
1-2	>7,5	Пробой по поверхности под герметиком				
2-3	7,0/6	-	8-50	30-56		
3-4	6,5/7	3-8	20-45	50-220		
4-5	6,0/4	3-4	3-4	30-40	≤ 3	
5-6	8,0/10	-	-	-	нет	7-8
6-7	6,5/9	нет	нет	2-3	5-11	

К приведённым результатам можно дать следующие комментарии.

~ Напряжение возникновения ЧР составляло (6,5 – 8) кВ. При толщине слоя в среднем 2 мм средняя напряжённость электрического поля, соответствующего возникновению ЧР составляла (3 – 3,5) кВ/мм.

~ Кажущийся заряд начальных ЧР не превышал 10 пКл. Увеличение напряжения на (15 – 20) % приводило к резкому росту кажущегося заряда ЧР до десятков пикокулон при небольшом приращении числа ЧР в периоде напряжения.

Заметим, что такое поведение характеристик характерно для протяженных по вектору поля воздушных включений.

4.3 Влияние неровностей обкладок на напряжённость электрического поля

Влияние неровностей обкладок на напряжённость электрического поля. Неровности обкладок возникают из-за неровностей крепированной бумаги и хорошо видны на рисунке 4.3. Расчёты электрического поля проводились в модели двух слоёв изоляции, разделённых неровной обкладкой. Пример картины электрического поля в такой модели приведён на рисунке 4.14.

Параметры модели были следующими: напряжение обкладок снизу вверх 17,2 кВ, 8,6 кВ, 0 кВ, расстояние между обкладками 2 мм, $\epsilon = 4$, радиус бугорков изменялся по длине средней обкладки от 1 до 0.1 мм.

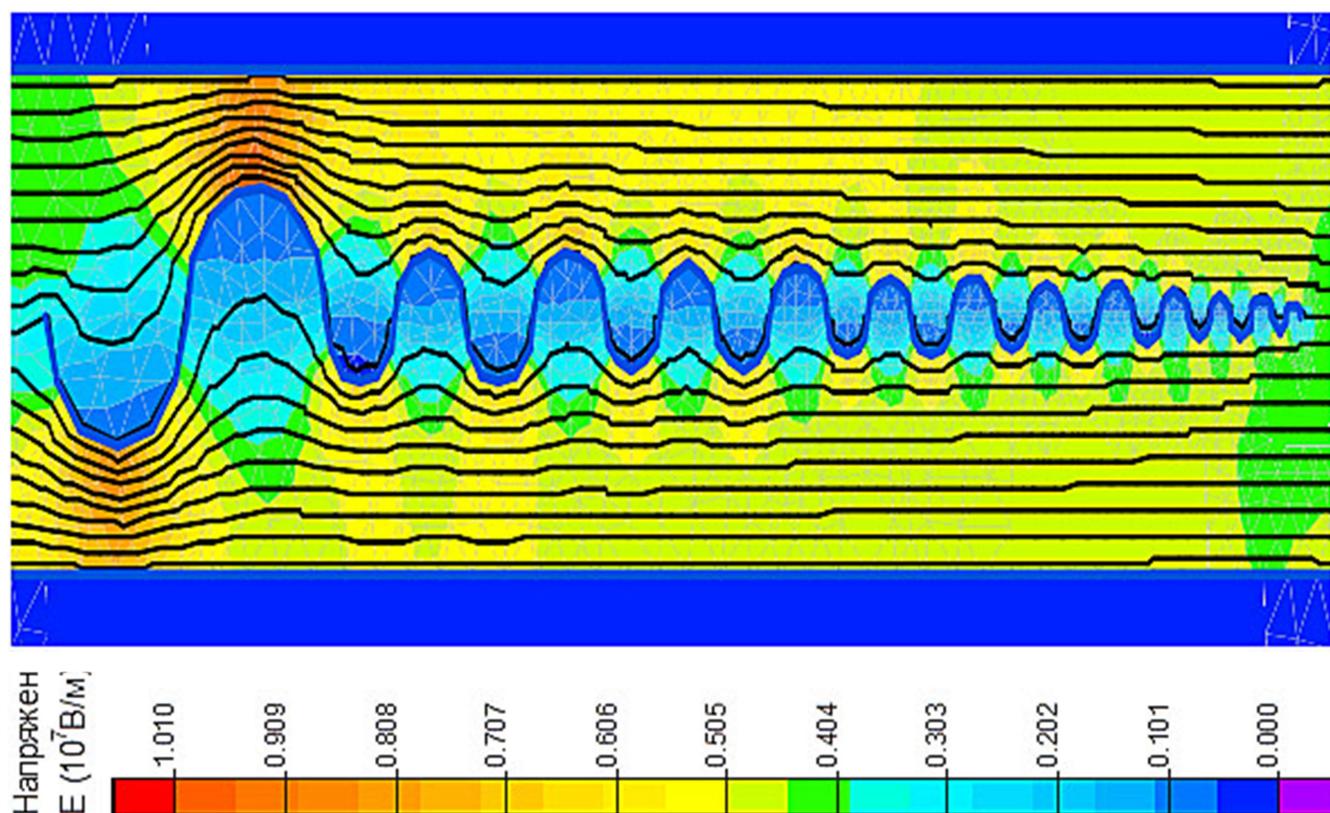


Рисунок 4.14 – Картина поля в двух слоях изоляции с бугристым средним электродом (обкладкой)

Видно, что локальные усиления напряжённости, вызванные неровностями не так велики, чтобы непосредственно вызвать пробой изоляции при условии её качественного изготовления. Электрическая прочность RIP – изоляции оценивается на уровне не ниже 30 кВ/мм. При средней напряжённости поля в слоях изоляции порядка 4 кВ/мм, даже двукратное локальное усиление поля, вызванное неровностями обкладок, не должно было бы столь кардинально, до нескольких месяцев, снижать срок службы вводов.

4.4 Механические напряжения во вводах

В изоляции остова ввода ещё в процессе изготовления или при эксплуатации могут возникнуть локальные механические напряжения. Они могут привести к возникновению трещин, в которых могут зажечься ЧР. Время до появления трещины можно определить по известному уравнению С.Н. Журкова [137]

$$\tau(\sigma, T) = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{W_a - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (4.3)$$

где k – постоянная Больцмана; $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с – время, по порядку величины близкое к периоду колебаний атомов в твёрдых телах; W_a – энергия активации процесса разрушения; $\gamma = qV_a$, где V_a – активационный объём в элементарном акте диссоциации, а σ – коэффициент локальных механических перенапряжений.

Величина q достигает 10-100 и выше при наличии дефектов, что и характеризует отличие экспериментальной величины прочности материалов от теоретической. Следует отметить, что зависимость (4.3) справедлива почти для всех материалов и в очень широком диапазоне механических напряжений и температур.

Для снятия механических напряжений в процессе изготовления зарубежными компаниями применяется отжиг изделия при температуре выше отверждения заливочного компаунда.

4.5 Диагностирование вводов с RIP-изоляцией

Рекомендуемая изготовителем номенклатура профилактических испытаний в условиях эксплуатации включает измерение сопротивления измерительного вывода мегомметром с напряжением 2,5 кВ постоянного тока, а также измерение тангенса угла диэлектрических потерь и ёмкости основной изоляции ($\operatorname{tg}\delta_1$ и C_1) на переменном напряжении промышленной частоты величиной 10 кВ_{эфф}.

Наше мнение по диагностированию несколько отличается. Если говорить о диэлектрических характеристиках, то их предпочтительнее измерять под рабочим напряжением и в режиме мониторинга, т.к. процесс деградации изоляции после пробоя её первого слоя может быстро завершиться полным пробоем остова ввода. При этом надо учитывать специфику поведения тангенса угла диэлектрических

потерь во времени. Величина $tg\delta$ может увеличиваться в стадии развития пробоя слоя изоляции и возвращаться к прежнему значению при завершении пробоя этого слоя. Кроме того, большой температурный перепад по длине ввода создаёт неопределённость в интерпретации результатов измерений. Поэтому более надёжным показателем может служить изменение ёмкости C_1 основной изоляции ввода [131]. На более ранней стадии развития дефекта основным показателем может стать интенсивность ЧР [138], измеренных под рабочим напряжением электрическим или электромагнитным методом. Другие принципиально возможные методы диагностирования, например, ИК- и УФ- инспекции рассматриваться как вспомогательные методы. Они могут помочь, но могут и не обнаружить дефект, особенно в случаях, когда он формируется в нижней части ввода, скрытой в баке трансформатора или в оболочке КРУЭ.

4.6 Расчётов кажущегося и истинного зарядов ЧР во вводах с изоляцией конденсаторного типа

Особенность формирования электрических сигналов частичных разрядов, возникающих в изоляции конденсаторного типа, состоит в том, что результат измерения кажущегося заряда существенно зависит от того, где находится очаг ЧР. Если ЧР возникает внутри слоя изоляции, то основная часть тока ЧР замыкается между обкладками, охватывающими этот слой, и лишь малая часть тока «идёт» на подзарядку внешних ёмкостей изоляции и оказывается доступной для регистрации. Соответственно, если размер полости меньше толщины слоя изоляции, кажущийся заряд ЧР, и без того малый по величине, дополнительно ослабляется, что и приводит к потере чувствительности регистрации ЧР.

Расчёты выполнены в программном комплексе для расчёта переходных процессов «ЕМТР».

Расчёты сигналов ЧР выполнен для двух схем (рисунок 4.15), соответствующих разным местам расположения очага ЧР.

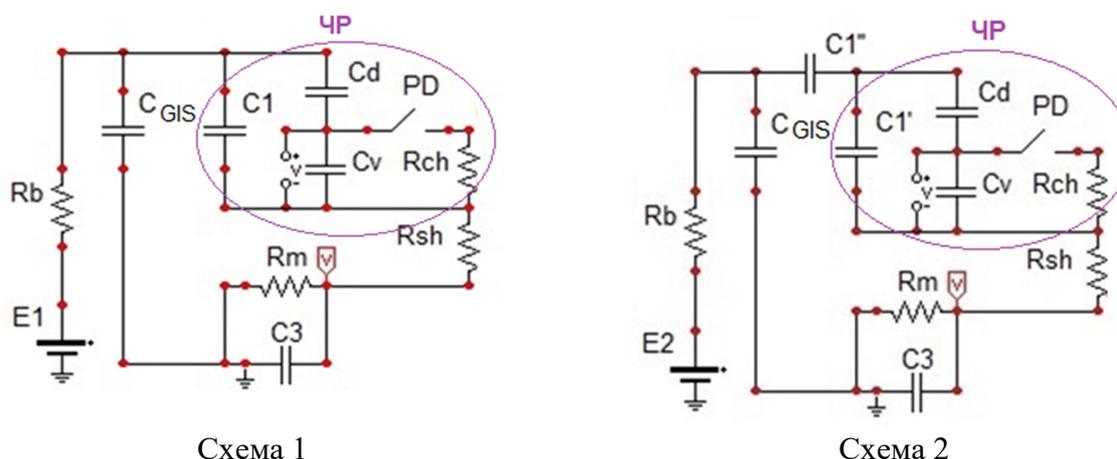


Рисунок 4.15 – Схемы для расчётов сигналов частичных разрядов

В схеме 1 ввод предполагался выполненным без обкладок, но с ёмкостью, близкой к реальному значению ёмкости основной изоляции ввода $C1 \approx 500$ пФ. В схеме 2 очаг ЧР помещён в слой изоляции между одной из пар выравнивающих обкладок ввода 500 кВ с общим количеством обкладок 15 и одинаковой между всеми обкладками ёмкостью слоя изоляции $C1' = 7,5$ нФ. Проверить, что результирующая ёмкость основной изоляции ввода в этом случае осталась той же можно по формулам (4.4, 4.5).

$$C1 = C1'/15 = 7500/15 = 500 \text{ пФ} \quad (4.4)$$

$$C1 = C1' \cdot C1''/(C1' + C1'') = 536 \cdot 7500/8036 \approx 500 \text{ пФ} \quad (4.5)$$

В расчётах моделировалось возникновение ЧР в воздушной полости, изоляция представлялась в виде классической ёмкостной схемы замещения. В обеих схемах воздушное включение представлено ёмкостью C_v , а ёмкость включения на электроды обозначена как C_d . Величины ёмкостей C_d и C_v в расчётной схеме могли задаваться достаточно произвольно. Действие ЧР имитировалось идеальным ключом и сопротивлением R_{ch} разрядного канала.

Параметры остальных элементов (таблица 4.2) подобраны таким образом, чтобы истинный заряд ЧР оставался неизменным в обоих расчётных случаях (4.6).

$$Q = U_v \cdot (C_v + C_d) = 100 \cdot (45 + 5) \cdot 10^{-1} = 5 \text{ нКл} \quad (4.6)$$

Таблица 4.2 – Обозначения и параметры элементов расчётных схем

Обозначение	Наименование	Номинал	Начальные условия
PD	Ключ, имитирующий ЧР		
Cv	Собственная ёмкость включения с ЧР	45 пФ	U0 = 100 В
Cd	Ёмкость включения на электроды	5 пФ	U0 = 900 В
Rch	Сопротивление канала ЧР	100 Ом	
Ctr	Ёмкость КРУЭ	5 нФ	U0 = E
C1	Ёмкость основной изоляции ввода	500 пФ	
C1'	Ёмкость между одной парой обкладок	7.5 нФ	U0 = 1 о.е.
C1''	Ёмкость всех остальных слоёв изоляции ввода	536 пФ	U0 = 14 о.е.
C3	Ёмкость изоляции последней обкладки ввода относительно земли	2 нФ	U0 = 0
Rsh	Сопротивление шунта	0.1 Ом	
Rm	Измерительное сопротивление	50 Ом	U0 = 0
Rb	Волновое сопротивление шин ПС	250 Ом	
E1, E2	Напряжения на шинах	E1 = 1 о.е. = 1 000 В E2 = 15 о.е. = 15000 В	

Расчётные осциллограммы токов ЧР приведены на рисунке 4.16,а, на рисунке 4.16,б приведены сигналы, выделенные на измерительном сопротивлении. Величины истинного заряда ЧР, Q , были определены интегрированием токов ЧР, а кажущихся зарядов, q , – интегрированием токов, протекающих при ЧР во внешней цепи (ток в шунте Rsh). Этот ток является суммой токов, протекающих через ёмкость изоляции последней обкладки ввода, $C3$, и через измерительное сопротивление, Rm .

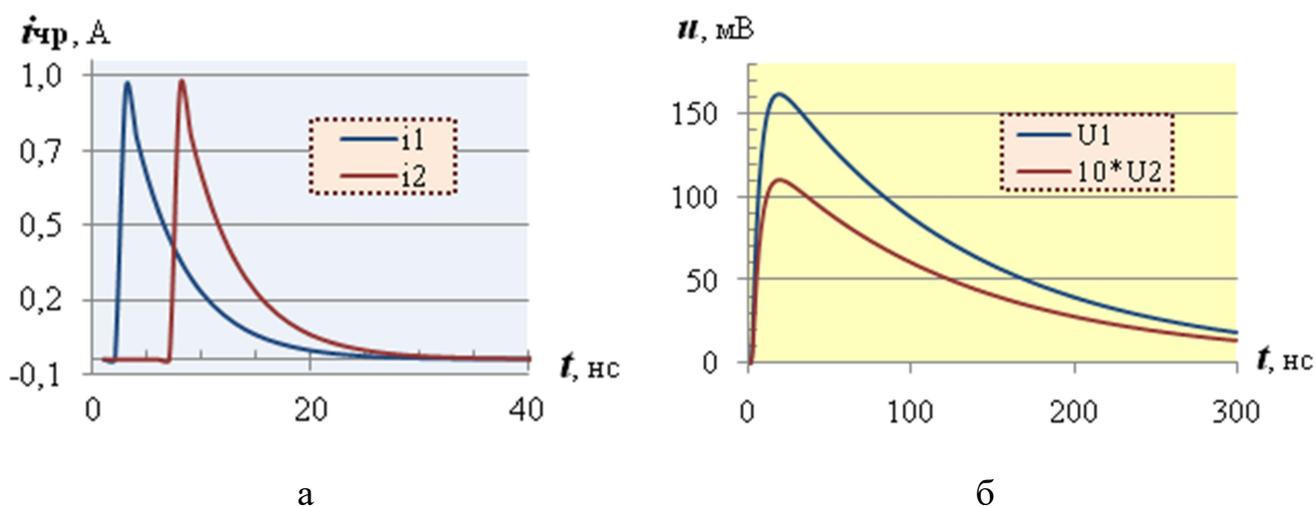


Рисунок 4.16 – Расчётные осциллограммы токов ЧР (а) и импульсов напряжения на измерительном сопротивлении (б)

Результаты расчётов, приведённые в таблице 4.3, подтверждают «маскирующий» эффект обкладок: при одинаковом истинном заряде кажущийся заряд в схеме 2 оказался в 14,5 раз меньше, чем в схеме 1. Примерно такое же соотношение имеет место в амплитудах сигналов: $U1/U2 \sim 14,5$. Необходимо отметить, что число слоёв изоляции было принято равным 15, т.е. прослеживается связь между количеством обкладок и степенью ослабления сигнала.

Таблица 4.3 – Сравнение расчётных величин токов и зарядов ЧР

Схема	$I_{\text{чр}}$, А	Q , нКл	$I_{\text{и}}$, мА	U , мВ	q , нКл	Q / q
1	0.908	4.99	64.7	161.4	0.454	11
2	0.915	5.03	4.4	11.1	0.031	160.2

4.7 Воздействие ЧР на изоляцию вводов

Вернёмся к вопросу о воздействии на изоляцию ЧР. Специфика твёрдой изоляции такова, что самозалечивания в ней не происходит. Процесс разрушения изоляции, единожды возникнув, уже не останавливается. Начальный, потенциально опасный дефект в виде воздушного включения, имеет объём менее 1мм^3 . Если в нём загорятся ЧР, то они могут привести к пробое в этом месте изоляции.

онной конструкции без существенных изменений указанных выше интегральных диэлектрических характеристик.

Зададимся вопросом: «В каких полях и в порах, каких размеров ЧР могут загореться?» Будем считать, что поры и капилляры в изоляции наполнены воздухом и давление воздуха порядка атмосферного. При этих допущениях можно определить напряжённости по правой части кривой Пашена. При этом надо учитывать влияние формы включения на величину и распределение электрического поля в его объёме.

В плоских полостях (например, в отслоении от фольговой обкладки, которое вполне вероятно из-за недостаточно хорошей адгезии смолы с алюминиевой фольгой) напряжённость поля в ϵ раз больше средней. При средней рабочей напряжённости, равной 4 кВ/мм, ЧР загораются в воздушных включениях практически всех размеров (под ними понимаются размер поперёк вектора поля) толщиной более 20 мкм.

В порах сферической формы напряжённость электрического поля имеет максимум на оси и примерно в 1,33 раза больше средней, т.е. порядка 5,2 кВ/мм. В соответствии с кривой Пашена для атмосферного давления ЧР должны загореться в порах с диаметром более 400 мкм или 0,4 мм. Будем считать, что включений такого размера в изоляции не возникает. Но, если учесть усиления поля за счёт неровностей обкладок, то реальность возникновения ЧР в порах меньших размеров возрастает. Особенно это касается краёв обкладок, где и напряжённость поля велика, и вероятность возникновения сферических воздушных включений выше, чем в других местах.

Исследования соотношения кажущегося и истинного заряда ЧР в порах сферической формы показали, что кажущийся заряд ЧР становится близок к истинному, только в том случае, когда размеры включения становятся сопоставимы с размерами межэлектродного промежутка. Учитывая толщину слоёв изоляции вводов и реальные размеры включений даже в (10 – 100) мкм, кажущийся заряд ЧР оказывается на два-три порядка меньше истинного заряда. Оценка истинного заряда даёт для пор диаметром 100 мкм величину 500 пКл. Это означает, что ка-

жущийся заряд ЧР, будучи измеренным в одном слое, составит (5 – 0,5) пКл. Кроме того, за счёт влияния обкладок он будет ещё в N раз меньше, где N – число слоёв изоляции [139]. По этой причине сферических включений испытатели «не чувствуют» вообще, хотя опасность ЧР в них никто «не отменял»!

В плоских включениях всё сложнее и «тяжелее», т.к. напряжённость поля достаточна для зажигания ЧР во всех отслоениях толщиной более 20 мкм. Кажущийся заряд, ЧР согласно [140] сильно зависит от толщины полости d , толщины b и относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика, точнее, от образования или отсутствия разрядов по поверхности из пятна осевшего заряда

$$d_{crit} \geq -2,8 \left(\frac{b}{\varepsilon}\right)^2 + 3,3 \left(\frac{b}{\varepsilon}\right) - 0,05 \quad (4.7)$$

При толщине слоя $b = (2 - 4)$ мм и $\varepsilon = 4$ получим $d_{crit} = (0,9 - 0,45)$ мм. Будем считать, что отслоений такого размера производитель не допускает. В отслоениях с $d < d_{crit}$ размеров включений ЧР формируются сериями микрозарядов и разряжают от 1 до 10 % полости. Остальная часть полости «не участвует в ЧР». Что-то более определённое сказать трудно, но в любом случае кажущийся заряд в N раз меньше, когда измеряем ЧР во всём вводе. Если принять $N = 10$ (ввод 110 кВ), то кажущийся заряд в 10 пКл соответствует истинному заряду ЧР в 100 пКл, а это уже немало. Во вводах более высокого напряжения с большим числом обкладок ситуация с чувствительностью регистрации ЧР электрическим методом усугубляется. Поэтому представляется необходимым проверять отсутствие ЧР не электрическими, а другими методами, например, электромагнитным или акустическим.

4.8 Выводы по разделу

~ Исследования внутренней структуры капиллярными методами (проникновение красящей жидкости и ртутная порометрия) образцов RIP-изоляции, вырезанных из отбракованного ввода 110 кВ, показали вероятность появления протяжённых капилляров и/или отслоений смолы от фольги уравнивающих обкладок. Появляются ли эти дефекты на стадии изготовления вводов или позднее, выяснить пока не удалось.

~ Установлено, что средняя напряжённость возникновения ЧР близка к рабочей в RIP -изоляции, а усиления поля на волнистой поверхности обкладок могут привести к возникновению и развитию ЧР достаточно опасной интенсивности.

~ Основной причиной повреждений RIP изоляции наиболее вероятно являются дефекты в виде газовых пор, которые являются следствием недостатков технологии. Мнимое отсутствие ЧР в них объясняется «экранирующим» действием уравнивающих обкладок по отношению к электрическим сигналам ЧР.

~ Для раннего обнаружения дефекта целесообразна регистрация ЧР электромагнитным или акустическим методами. На стадии пробоя отдельных слоёв изоляции и для предотвращения полного разрушения ввода наиболее целесообразен мониторинг токов утечки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Диагностирование или мониторинг технического состояния КРУЭ предполагает контроль утечек или давления элегаза и его свойств, а также обнаружение и оценку опасности ряда дефектов на основе регистрации уровня ЧР.

2. Каждому из методов регистрации ЧР присущи недостатки и достоинства. Электрический метод имеет низкую помехозащищённость. Регистрация электромагнитного излучения ЧР в диапазоне ультравысоких частот свободна от помех. Однако, сложность интерпретации результатов измерения ограничивает внедрение метода. В этой связи представляется логичным объединить достоинства обоих методов, компенсируя их индивидуальные недостатки. Применительно к КРУЭ с кабельными присоединениями совместное применение методов позволит также разделить сигналы, относящиеся к ЧР в изоляции кабелей (муфт) и в КРУЭ.

3. Акустический метод принципиально непригоден для оценки интенсивности ЧР, но наиболее приспособлен для поиска места расположения очагов ЧР.

4. Большинство видов регистрации ЧР проводится в приёмо-сдаточных испытаниях на заводе или на месте монтажа КРУЭ, а установка систем непрерывного диагностического мониторинга требует солидных капитальных вложений.

5. Разработано устройство передачи сигнала по ВОЛС, обеспечивающее защиту от наведённых помех и гальваническую развязку регистрирующей аппаратуры и диагностируемого объекта.

6. Предложен способ очистки сигнал от низкочастотных помех с помощью фильтра верхних частот на основе отрезка коаксиального кабеля, замкнутого на заземлённом конце его экрана.

7. Разработан алгоритм расчёта оптимального количества датчиков ЧР для проведения экспресс диагностики КРУЭ.

8. Предложены новые способы имитации ЧР для градуировки схемы регистрации ЧР.

9. На практике проверена возможность применения разработанного метода экспресс регистрации частичных разрядов в КРУЭ.

10. Установлено, что ВЧ связь, используемая на примыкающих воздушных линиях, является существенным источником помех при регистрации сигналов ЧР. В связи с этим при проведении диагностики требуется, тщательный выбор места подключения датчиков или использование высокочастотных фильтров.

11. Исследования внутренней структуры капиллярными методами (проникновение красящей жидкости и ртутная порометрия) образцов RIP-изоляции, вырезанных из отбракованного ввода 110 кВ, показали вероятность появления протяжённых капилляров и/или отслоений смолы от фольги уравнительных обкладок. Появляются ли эти дефекты на стадии изготовления вводов или позднее, выяснить пока не удалось.

12. Установлено, что средняя напряжённость возникновения ЧР близка к рабочей в RIP -изоляции, а усиления поля на волнистой поверхности обкладок могут привести к возникновению и развитию ЧР достаточно опасной интенсивности.

13. Основной причиной повреждений RIP изоляции наиболее вероятно являются дефекты в виде газовых пор, которые являются следствием недостатков технологии. Мнимое отсутствие ЧР в них объясняется «экранирующим» действием уравнительных обкладок по отношению к электрическим сигналам ЧР.

14. Для раннего обнаружения дефекта целесообразна регистрация ЧР электромагнитным или акустическим методами. На стадии пробоя отдельных слоёв изоляции и для предотвращения полного разрушения ввода наиболее целесообразен мониторинг токов утечки.

СОКРАЩЕНИЯ

- В** – выключатель;
- ВЧП** – высокочастотные перенапряжения;
- ИК** – инфракрасный;
- МЭС** – магистральные электрические сети
- ФСК ЕЭС** – Федеральная Сетевая Компания Единой Энергетической Системы
- ОПН** – ограничитель перенапряжений нелинейный;
- ОРУ** – открытое распределительное устройство;
- ПС** – подстанция;
- Р** – разъединитель;
- ТТ** – измерительный трансформатор тока;
- УФ** – ультрафиолетовый;
- (Х)АРГ** – (хроматографический) анализ газов, растворённых в элегазе;
- ЧР** – частичный разряд;
- КРУЭ** - комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией в металлической оболочке;
- ЭМС** – электромагнитная совместимость;
- СНиП** – строительные нормы и правила;
- РЭ** – руководство по эксплуатации;
- РД** – руководящие документы;
- ЗИП** – запасные части и принадлежности;
- МЭК** – Международная электротехническая комиссия;
- ПДК** – предельно допустимая концентрация;
- ПУЭ** – Правила устройства электроустановок, 7-е издание;
- ПТЭ** – Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации;
- РУ** - распределительное устройство.

ТЕРМИНЫ

В работе применены термины с соответствующими определениями по [6]:

Ввод «воздух-элегаз» - конструктивное исполнение соединения конечного фидерного элемента КРУЭ с воздушной линией электропередачи.

Ввод «кабель-элегаз» - конструктивное исполнение соединения конечного фидерного элемента КРУЭ с кабельной линией.

Ввод «масло-элегаз» - конструктивное исполнение соединения конечного фидерного элемента КРУЭ с масляным трансформатором.

Внутренняя изоляция - твердая, газообразная изоляция (или их комбинация) внутренних частей КРУЭ, не подвергающаяся непосредственному влиянию атмосферных и других внешних факторов (загрязнение, увлажнение и пр.).

Газоизолированный отсек (КРУЭ) - полностью герметизированная часть КРУЭ, доступная для соединения со смежными частями КРУЭ и управления.

Герметичный опорный изолятор - опорный изолятор, отделяющий один отсек от других отсеков КРУЭ.

Главная токоведущая цепь - все первичные токопроводящие части КРУЭ.

Комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией в металлической оболочке (КРУЭ) – комплектное распределительное устройство, заключённое в металлическую оболочку, в котором для изоляции, по меньшей мере частичной, используется элегаз или смесь элегаза с другим газом (азотом или хладоном).

Контроль качества газа – проверка газа на соответствие его характеристик нормированным значениям для применения в КРУЭ.

Новый элегаз (новая шестифтористая сера) - SF₆, характеристики которой соответствуют ТУ 6-02-1248-83 и которая ранее не закачивалась в оборудование (элегаз в ёмкости для хранения).

Оболочка КРУЭ – часть КРУЭ, содержащая элегаз (газ) в предписанных условиях, необходимых для безопасного поддержания нормированного уровня изоляции, защищающая оборудование от внешних воздействий, обеспечивающая высокую степень защиты персонала и подлежащая заземлению.

Опорный изолятор - внутренний изолятор, поддерживающий один или более проводников.

Определение утечки газа по «запаху» (обнюхивание) – медленное перемещение течеискателя в местах возможного нарушения герметичности оборудования для определения места течи газа.

Относительная скорость утечки газа – абсолютная утечка газа, отнесенная к общему количеству газа в системе при номинальном давлении при заполнении (или плотности), выраженная в процентах за год.

Срок службы – продолжительность эксплуатации оборудования или её обновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Техническое обслуживание - комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

Частичные разряды – электрические разряды очень небольшой мощности, возникающие внутри изоляции или на её поверхности.

Элегаз, бывший в употреблении - SF₆, находящаяся в оборудовании или извлечённая из него и не прошедшая обработку для повторного использования.

Элемент КРУЭ – составная часть КРУЭ, выполняющая определенные функции в распределительном устройстве (например, выключатель, разъединитель, заземлитель, измерительные трансформаторы, сборные шины, ввод, шкаф управления и т.п.), включая заземляющую цепь КРУЭ.

Ячейка – упорядоченное, в соответствии с первичной электрической схемой соединение элементов КРУЭ; является законченным изделием (в полюсном или трёхполюсном исполнении), выполняющим определяемую первичной электрической схемой функцию в составе КРУЭ (линейная, секционная и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гохберг, Б.М. Элегаз – электрическая газовая изоляция [Текст] /Б.М. Гохберг // Электричество. – 1947. – № 3. – С.15 – 19.
- 2 Полтев, А.И. Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения. – [Текст]. – Л.: Энергия, 1979. – 239 с.
- 3 Аракелян, В.Г. Физическая химия элегазового электротехнического оборудования. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 296 с.
- 4 Бортник, И.М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 80 с.
- 5 Агафонов, Г.Е. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией / Под ред. Ю.И.Вишневого. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 2002. – 728 с.
- 6 Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.35.184 – 2014. Комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией в металлической оболочке (КРУЭ) 110 кВ и выше. Общие технические условия. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/about/standards_organization (Дата обращения: 30.12.2015).
- 7 Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.60.115-2012. Токопроводы элегазовые на напряжение 110 – 500 кВ. Общие технические условия. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/about/standards_organization (Дата обращения: 30.12.2015).
- 8 Стандарт МЭК 62271-203:2003 Коммутационная аппаратура и аппаратура управления высокого напряжения. Часть 203. Распределительные устройства с элегазовой изоляцией в металлическом кожухе на номинальные напряжения свыше 52 кВ». (IEC 62271-203:2003 High-voltage switchgear and controlgear - Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV).
- 9 Стандарт МЭК 60480:1974 «Руководство для проверки шестифтористой серы (SF₆), взятой из электрического оборудования». (IEC 60480:1974 Guide to the checking of sulphur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment).

10 Инвестиционная программа ОАО «ФСК ЕЭС» на 2013 – 2017 годы. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/pril_2013-2017.pdf (Дата обращения: 30.12.2015).

11 Каталог оборудования КРУЭ ООО "Хендэ Электросистемы". – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hdes.ru/upload/Catalog-KRUE.pdf> (Дата обращения: 08.01.2015).

12 АВВ каталог продукции. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new.abb.com/high-voltage/ru/krue/krue-na-72-5-1200-kv/krue-serii-elk-3-do-550-kv>. – (Дата обращения: 30.01.2017).

13 AREVA каталог. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.areva-td.com> – (Дата обращения: 30.01.2017).

14 Борин, В.Н. Состояние и перспективы развития элегазового коммутационного оборудования. – [Текст] / В.Н. Борин, В.Д. Ковалёв // Электро. – 2013. – № 2. – С. 32 – 36.

15 Каталог ЗЭТО – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.zeto.ru/products_and_services/catalog – (Дата обращения: 30.01.2017).

16 Rodhe, H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect [Текст] / H. Rodhe. // Science. – 1990. – Vol. 248. – pp. 1217 – 1219.

17 Report of CIGRE WG 23.10. SF6 and the Global Atmosphere [Текст] // Electra. – 1996. – No. 164. – pp.121 – 132.

18 Аракелян, В.Г. Определение утечки элегаза из электротехнических аппаратов [Текст] / В.Г. Аракелян, В.Н. Демина // Электротехника. 1992. – № 4 – 5. – С. 65 – 68.

19 Долин, А.П. Эффективность использования лазерного течеискателя элегаза «КАРАТ» для определения места и уровня развития дефектов электрооборудования [Текст] / А.П. Долин, А.И. Карапузиков, Ю.А. Ковалькова // Электро. – 2009. – № 6. – С. 25 – 28.

20 Штыров, М.Ю. Новое оборудование и новые методы поиска утечек элегаза из газонаполненного оборудования // Материалы 9-го н.-практ. семинара об-

ществленного совета специалистов Сибири и Востока, Красноярск-Дивногорск. – 2014. – С. 16 – 33.

21 DILO Catalogues. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dilo-gmbh.com> (Дата обращения: 29.01.2017).

22 Тепловизоры FLIR. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pergam.ru/brands/FLIR/> (Дата обращения: 29.01.2017).

23 Christophorou, L.G. SF₆/N₂ Mixtures: Basic and H.V. Insulation Properties [Текст] / L.G. Christophorou, R.J. van Brunt // IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insul. – 1995. – Vol. 2. No 5. – pp. 952 – 1003.

24 Arakelian, V.G. Diagnostics for the condition of SF₆ equipment based on physico-chemical parameters [Текст] / V.G. Arakelian, A.J Kovalenko // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2001. – Vol. 17, No. 2. – pp. 42-51.

25 Аракелян, В.Г. Оперативная диагностика состояния элегазового оборудования по физико-химическим показателям [Текст] / В.Г. Аракелян // Электротехника. – 2002. – № 3. – С. 56 – 65.

26 Аракелян, В.Г. Цели, понятия и общие принципы диагностического контроля высоковольтного электротехнического оборудования [Текст] / В.Г. Аракелян // Электротехника. – 2002. – № 5. – С. 23 – 27.

27 Аракелян, В.Г. Идеология построения автоматической системы контроля элегазового электротехнического оборудования [Текст] / В.Г. Аракелян // Электротехника. – 2002. – № 6. – С. 5 – 13.

28 РД 16-066—83. Электрооборудование высокого напряжения. Технические требования к производству и методы контроля для обеспечения качества элегаза. – М.: СПО ОРГРЭС, 1987. – 21 с.

29 ГОСТ Р 54426-2011 (МЭК 60480: 2004). Руководство по проверке и обработке элегаза (SF₆), взятого из электрооборудования, и технические требования к его повторному использованию. – М.: Изд-во Стандартиформ. – 2014. – 23 с.

30 Аракелян, В.Г. Усовершенствованный метод определения кислотности элегаза в оборудовании [Текст] / В.Г. Аракелян, В.Н. Демина // Электротехника. – 2001. – №3. – С. 19 – 22.

- 31 Аракелян, В.Г. Анализ состояния влаги в элегазовом электрооборудовании [Текст] / В.Г. Аракелян // Электротехника. – 1993. – № 9-10. – С. 32 – 35.
- 32 Аракелян, В.Г. Предотвращение конденсации влаги в элегазовом электрооборудовании [Текст] / В.Г. Аракелян // Электротехника. – 1993. – № 5. – С. 54 – 57.
- 33 Аракелян, В.Г. Электроизоляционные материалы для работы в элегазе. Определение стойкости компаундов к продуктам разложения шестифтористой серы [Текст] / В.Г. Аракелян, Г.П. Бочкарева [и др.] // Электротехническая промышленность. Сер. ЭМ. – 1974. – Вып. 2(43). – С. 7 – 9.
- 34 Аракелян, В.Г. Выбор конструкционных материалов для элегазовой аппаратуры [Текст] / В.Г. Аракелян, И.М. Бортник // Электротехника. – 1979. – №7. – С. 26 – 27.
- 35 Харитонов, Ф.Я. Исследование устойчивости керамических материалов в продуктах разложения элегаза [Текст] / Ф.Я. Харитонов, С.С. Вишневская [и др.] // Электротехника. 1991. № 1. С. 13—16.
- 36 Braun, J.M. Long Term Reliability of Cast Epoxy Insulators in Gas-Insulated Equipment / J. M. Braun, N. Fujimoto [и др.] // Proc. of 34th CIGRE Session, Paris, 1990.– Paper 15/33-07. – [Электронный ресурс].
- 37 Prakash, K.S. Movement of Particles in Compressed SF6 GIS with Dielectric Coated Enclosure [Текст] / K.S. Prakash, K.D. Srivastava, M.M. Morcos // IEEE Trans. On Dielectric and Electrical Insul. – 1997. – Vol. 4. – No 3. – pp. 344– 347.
- 38 Indira, M.S. Motion of Conducting Particles Causing Inadvertent Outages in GIS [Текст] / M.S. Indira, T. S. Ramu // IEEE Transactions on DEIS. – 2000. – Vol. 7. – No. 2. – pp. 247 – 253.
- 39 Maitly, P. Degradation of Polymer Dielectrics with Nanometric Metal Oxide Fillers due to Surface Discharges [Текст] / P. Maitly, S. Basu, [et al] // IEEE Transactions on DEIS. – 2008. – Vol. 15. – No. 1. – pp. 52 – 62.
- 40 Maitly, P. Improvement of Surface Degradation Properties of Polymer Composites due to Pre-processed Nanometric Alumina Filters [Текст] / P. Maitly, S. Basu, [et al] // IEEE Transactions on DEIS. – 2008. – Vol. 15. – No. 1. –pp. 63 – 72.

- 41 Braun, J. M. Modulation of Partial Discharge Activity in GIS Insulators by X-ray Irradiation [Текст] / J. M. Braun, S. Rizzetto, [et al] // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1991. – Vol. 26. – No. 3. – pp. 460 – 468.
- 42 Fuhrmann, H. Pulsed X-ray induced partial discharge measurements - a new testing technique for HV insulation/ H. Fuhrmann, U. Riechert, A. Troger // Proc. Of the CIGRE Session, Paris, 2010. – Report D1 – 206. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).
- 43 Swinka, V. Imaging of voids in dielectric materials by x-ray induced partial discharge [Текст] / V. Swinka, F. R. Robert // Review of scientific instruments, 2002. – v. 73. – N 3. – С. 1288 – 1292.
- 44 Van Brunt, R.J. Mechanisms for Inception of DC and 60-Hz AC Corona in SF6 [Текст] / R.J. Van Brunt, M. Misakian // IEEE Trans. Elec. Insul. – 1982. – Vol. EI – 17. – pp. 106 – 120.
- 45 Van Brunt, R.J. Stochastic Properties of Partial-Discharge Phenomena [Текст] / R.J. Van Brunt // IEEE Trans. Elec. Insul. – 1991. – Vol. 26. – pp. 902 – 948.
- 46 Van Brunt, R.J. Nonstationary Behavior of Partial Discharge During Discharge-Induced Aging of Dielectrics [Текст] / R.J. Van Brunt, P. von Glahn, T. Las // IEE Proc.-Sci., Meas., Tech. – 1994. – Vol. EI-17. – pp. 761 – 784.
- 47 Van Brunt, R.J. Partial Discharge-Induced Aging of Cast Epoxies and Related Nonstationary Behavior of the Discharge Statistics [Текст] / R.J. Van Brunt, T. Las // 1993 Annual Report – Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, NY. – 1993. – pp. 455-461.
- 48 Ogle, D.B. Current Pulses in SF6 Glow Discharges [Текст] / D.B. Ogle, G.A. Woolsey // D: Appl. Phys. – 1989. – Vol. 22. – pp. 1892 – 1834.
- 49 Ishida, T. Computer Aided Partial Discharge Analyzing System for Detection of Swarming Pulsive Microdischarges [Текст] / T. Ishida, Y. Mizumo [и др.] // IEE Conference Proceedings. – 1993. – No. 378. – pp. 99 – 100.
- 50 Tsurimoto, T. Correlation between two frequency components of various PD pulses in GIS [Текст] / T. Tsurimoto, H. Muto, [et al] // Proc. Int. Symp. Electrical Insulating Materials. – 1998. – vol. P2-15. – pp. 653–656.

51 Eliasson, B. Modeling and Applications of Silent Discharge Plasmas [Текст] / B. Eliasson, V. Kogelschatz // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1991. – Vol. 19. – P. 309.

52 Braun, J. M. Determination of Gases and Gas Pressure in GIS Spacer Voids [Текст] / J. M. Braun, J. H. Groeger // 1989 Annual Report – Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Publication 89CH2773-0. – 1989. – pp. 105 – 110.

53 ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. – М.: Стандартинформ, 2014. – 43 с.

54 Вишнеvский Ю.И. Герметизированные установки высокого напряжения с элегазовой изоляцией для высоковольтных испытаний КРУЭ с измерением характеристик частичных разрядов [Текст] / Ю.И. Вишнеvский, И.С. Аршанский, Б.Д. Сыромятников // Электротехника. – 1991. – № 11. – С. хх-уу.

55 Arshansky, I.S. The development of SF6-insulated test-sets for GIS dielectric tests / I.S. Arshansky, S.Y. Matveev, [et al] // Proc. of 9th Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Graz, Austria, 1995. – Report 5276. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

56 Syromyatnikov, B.D. PD measurements in GIS. Combined method for free metal particles / B.D. Syromyatnikov // Proc. of 9th Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Graz, Austria, 1995. – Report 5653. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

57 Vishnevsky, Y.I. High-voltage test procedures with partial discharge measurements / Y.I. Vishnevsky, E.D. Garbar, [et al] // Proc. of 7th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Drezden, 1991. – Report 31.08. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

58 Braun, J.M. Reliability of GIS Epoxy Insulators: the Need and Prospects for More Stringent Acceptance Criteria [Текст] / J.M. Braun, G.L. Ford, [et al] // IEEE Trans. On Power Delivery. – 1993. – Vol. 8. No 1. – pp. 121 – 131.

59 Buesch, W. Application of Partial Discharge Diagnostics in GIS at On-Site Commissioning Tests / W. Buesch, H.P. Dambach, [et al] // Proc. of the 37th CIGRE

Session. – Paris. – 1998.– Paper 15 –104. – [Электронный ресурс].– 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

60 Беляевский, О.А. Регистрация характеристик частичных разрядов в элегазовом оборудовании с использованием измерительного трансформатора ЗНОГ-110 [Текст] / О.А. Беляевский, В.В. Степанков // Энергетик. – 1999. – № 6. – С. 22 – 24.

61 Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Проблематика и математическое моделирование множества частичных разрядов в электрической изоляции // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2016. № 4 (188). С. 125-132.

62 Kinsht N.V., Petrunko N.N. Regularities of the formation an integrated partial discharges picture as a set of quasideterministic processes // В сборнике: Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2015 8. 2015. С. 303-306.

63 Neumann, C. PD Measurements on GIS on Different Designs by Non-Conventional UHF Sensors / C. Neumann, B. Krampe, [et al] // Proc. 2000 CIGRE Session. – [Электронный ресурс]. – Report 15 – 305. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

64 Mizuno, K. Investigation of PD pulse propagation characteristics in GIS [Текст] / K. Mizuno, A. Ogawa, [et al] // IEEE Trans. Power Syst. – 1997– vol. 12. – no. 2. – pp. 1022–1030.

65 Judd, M.D. The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS [Текст] / M.D. Judd, O. Farish, B.F. Hampton // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 1996. – vol. 3. – no. 2. – pp. 213–228.

66 Hoshino, T. Real-time PD identification in diagnosis of GIS using symmetric and asymmetric UHF sensors [Текст] / T. Hoshino, K. Nojima, M. Hanai // IEEE Trans. Power Del. – 2004. – vol. 19. – no. 3. – pp. 1072–1077.

67 Endo, F. Innovation of GIS Insulation Monitoring Techniques and Application to Remote Monitoring System / F. Endo, H. Hama, [et al] // Proc. Of 38th CIGRE

Session. – Rep. 15 – 103. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

68 Hoshino, T. Fundamental approach to estimating the actual charge of a partial discharge in a GIS using a three-dimensional electromagnetic analysis / T. Hoshino, S. Maruyama, T. Nakajima // XVIIth Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Hannover, Germany. – 2011. – Paper D – 004. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

69 Kurrer, R. The Applications of Ultra High Frequency Partial Discharge Measurements in Gas Insulated Substations [Текст] / R. Kurrer, K. Feser // IEEE Trans. On Power Delivery. – 1998. – Vol. 13. No 3. – pp.777 – 782.

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

71 Степенков, В.В. Исследование зависимостей электрических и акустических сигналов ЧР с дефектов изоляции КРУЭ / В.В. Степенков, В.Ф. Цалко. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.highvolt.ru/doc/izo_krue.pdf (Дата обращения: 30.12.2015).

72 Report of the CIGRE TF15/33.03.05. PD Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method [Текст] // ELECTRA. – 1999. – no. 183. – pp. 75–87.

73 Hoshino, T. A unique sensitivity verification combined with real-time PD identification method [Текст] / T. Hoshino, S. Maruyama, [et al] // IEEE Trans. Power Del. – 2005. – vol. 20. – no. 3. – pp. 1890–1896.

74 Hoshino, T. A novel technique for detecting electromagnetic wave caused by partial discharge in GIS [Текст] / T. Hoshino, K. Kato, [et al] // IEEE Trans. Power Del. – 2001. – vol. 16. – no. 4. – pp. 545–551.

75 Hoek, S.M. Distribution and propagation mechanisms of PD pulses UHF or UHF and traditional electrical measurements / S.M. Hoek, M. Koch, M. Heindl // Proceed. of the XVIIth Int. Symp. on High Voltage Engineering, Hannover, Germany. – August 22–26, 2011. – Paper D – 075. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

76 Ohtsuka, S. Measurement of PD current waveforms in SF₆ gas with a super high frequency wide band measurement system / S. Ohtsuka, K. Fukuda, A. Sogabe // Proc. of XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 2011.– Paper D – 074. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

77 Reid, J. High Bandwidth Measurement of Partial Discharge Pulses in SF₆ / J. Reid, M.D. Judd // Proceed. of the XIVth Intern. Symp. on High Voltage Engineering. Beijing, China. – 2005. – Paper G – 012. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

78 Hoshino, T. Fundamental approach to estimating the actual charge of a partial discharge in a GIS using a three-dimensional electromagnetic analysis / T. Hoshino, S. Maruyama, T. Nakajima // XVIIth Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Hannover, Germany. – 2011. – Paper D – 004. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт. диск (CD-ROM).

79 Zhang, X. Relationship between UHF Signals and Apparent Charge of Partial Discharge Defects in GIS Model / X. Zhang, J. Tang, J. Tang, Y. Chen, Y.Xie // Proc. of XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 2011. – Paper D – 011. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

80 Working Group 15.03. Diagnostic Methods for GIS Insulating Systems // Proc. of 34th CIGRE Session, 1992. – Paper 15/23 – 01. – [Электронный ресурс].– 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

81 Rethmeier, K. Benefits of Synchronous UHF and IEC-compliant PD Measurements for Effective Noise Suppression / K. Rethmeier, W. Weisenberg, [et al] // Proc. of XVIth Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Cape Town, 2009. – Paper D – 53. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

82 Hoshino, T. Comparison of sensitivity between UHF method and IEC 60270 for on-site calibration in various GIS [Текст] / T. Hoshino, H. Koyama, [et al] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – vol. 21, No. 4. – pp. 1948 – 1953.

83 IEC TS 62478 Edition 1.0, 2016-08. TECHNICAL SPECIFICATION - High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods IEC Central office, Geneva, Switzerland, 2016. – 70 с.

84 В. П. Вдовико. Методология диагностирования высоковольтного электрооборудования / В. П. Вдовико ; ООО "Энергетика, микроэлектроника, автоматика". – Новосибирск : Наука : Сибирская издательская фирма, 2011. – 119 с

85 Pearson, J. S. Continuous UHF Monitor for Gas-insulated Substations [Текст] / J.S. Pearson, B.F. Hampton, A.G. Sellars // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1991. – Vol. 26. – No. 3. – pp. 469 – 478.

86 Jones, C.J. Guidelines Monitoring for Control and Supervision of GIS Incorporating Advanced Technologies / C.J. Jones, O. Beierl, [et al] // Proc. of 34th CIGRE Session, 1992.– Paper 23 – 203. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

87 Pearson, J.S. Partial Discharge Diagnostics for Gas Insulated Substations [Текст] / J.S. Pearson, O. Farish, [et al] / IEEE Trans. on Dielec. and Electrical Insulation. – 1995. – Vol. 2. - No 5. – pp. 893 – 905.

88 Matsushita, Y. Опыт применения систем мониторинга и диагностики для повышения эффективности проведения техобслуживания, стабильности электропитания и оптимизации ремонтов [Текст] / Y. Matsushita, H. Chida, [et al] // Энергоэксперт. – 2014. – № 5. – С. 58 – 62.

89 Geng, B. The comparison of sensitivity between the UHF and Ultrasonic methods for partial discharge detecting in GIS / B.Geng, C. Li, [et al] // Proc. of the XVII Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011. – Paper D – 008. – [Электронный ресурс].– 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

90 Kranz, H.-G. Fundamentals in computer aided PD processing, PD pattern recognition and automated diagnosis in GIS / H.-G. Kranz // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulation. – 2000. – vol. 7. – no. 1. – pp. 12–20.

91 Meijer, S. Advanced Partial Discharge Diagnosis as Early Warning System to Recognize Defects in Gas-Insulated Switchgear (GIS) / S. Meijer, E. Gulski, [et al] //

Proc. 2000 CIGRE Session. – Rep. 15 – 308. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

92 Meijer, S. Pattern analysis of partial discharges in SF6 GIS [Текст] / S. Meijer, E. Gulski, J. J. Smit // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 1998. – vol. 5. – no. 6. – pp. 830–842.

93 Ziomek, W. Applications of Genetic Algorithms to Pattern Recognition of Defects in GIS [Текст] / W. Ziomek, M. Reformat, E. Kuffel // IEEE Transactions on DEIS. – 2000. – Vol. 7. – No. 2. – pp. 161 – 168.

94 Okabe, S. Detection of Harmful Metallic Particles inside Gas Insulated Switchgear using UHF Sensor [Текст] / S. Okabe, T. Yamagiwa, H. Okubo // IEEE Transactions on DEIS. – 2008. – Vol. 15. – No. 3. – pp. 701 – 709.

95 IEEE Substations Committee Report. Bibliography on Gas Insulated Substations // IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems. 1977. – vol. 96. – No. 4. – pp. 1280 – 1287.

96 IEEE Substations Committee Report. Addendum I To Bibliography of Gas Insulated Substations, // IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems. 1989. – vol. 4. – No. 2. – pp. 1003 – 1020.

97 Передача по оптоволокну. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dfs-group.ru/technical-information/optovolokno> (Дата обращения: 05.03. 2013).

98 Арутюнов, В.А. Высокочастотный регистратор переходных процессов и опыт его применения на подстанции 500 кВ "Ногинск-500" [Текст] / В.А. Арутюнов // Электроэнергетика: сегодня и завтра. – 2012. – № 4. – С. 65 – 68.

99 Halkiadis, I.S. A high-voltage low-cost wide-band fiber optic transmission system with improved linearity [Текст] / I.S. Halkiadis, N.G. Theofanous, D.A. Greaves // Electric Power Systems Research. – 1996. – No. 37. – pp. 121 – 128.

100 Высокоточное устройство передачи аналоговых сигналов по оптоволоконному каналу. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.r-technology.ru/products/examples/upd.php> (Дата обращения: 18.10.2011).

101 Семенов, Ю.А. Оптоволоконные каналы и беспроводные оптические связи. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://book.itep.ru/3/optic_32.htm (Дата обращения: 18.11.2011).

102 Буткевич, В. Опыт схемотехнических решений гальванической развязки в устройствах ЦОС для лабораторных и промышленных применений / В. Буткевич, В. Невзоров, А. Абакумов. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lcard.ru/publ-1.php3> (Дата обращения: 3.11.2012).

103 Передача по оптоволокну. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dfs-group.ru/technical-information/optovolokno/> (Дата обращения: 23.01.2013).

104 Марюшко, Е.А. Разработка помехозащищённого аналогового волоконно-оптического измерительного тракта [Текст] / Е.А. Марюшко, Ф.Л. Бык / Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды III междунар. н.-техн. конф.: сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т. 2. – С.403.

105 Пат. 131525 Российская Федерация, МПК G08C23/06. УСТРОЙСТВО ПЕРЕДАЧИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ [Текст] / Марюшко Е.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский государственный технический университет"; заявл. 29.08.2012; опубл. 20.08.2013.

106 Марюшко, Е.А. Устройство регистрации коммутационных перенапряжений в КРУЭ / Сб. статей ПЭИПК «Перенапряжения и надёжность эксплуатации электрооборудования. Вып.7: Современные средства защиты электрических сетей предприятий электроэнергетики от перенапряжений. Электромагнитная совместимость оборудования подстанций 110 кВ и выше. Регистрация и измерения импульсных электромагнитных воздействий на электрооборудование. Нормативные документы по защите электрооборудования от перенапряжений» / Под редакцией Ф.Х.Халилова – СПб.: ПЭИПК, 2014. – С.184 – 190.

107 Марюшко, Е.А. Волоконно-оптический измерительный тракт [Текст] // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 4. – С. 140.

108 Марюшко, Е.А. Методы создания искусственного частичного разряда в КРУЭ [Текст] // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V междунар.

науч.- техн. конф. г. Томск, 10-14 ноября 2014 г. – Томск: Томский политехнический университет. – Т.2. – С. 120 – 123.

109 Марюшко, Е.А. Применение оборудования с элегазовой изоляцией в современной энергетике и методы его диагностики [Текст] // Диагностика электрических установок: Материалы 9-го н.-пр. семинара Общ. Совета специалистов Сибири и Д. Востока. – Красноярск, Дивногорск: ОСС ДЭУ. – 2014. – С. 5 – 15.

110 Марюшко, Е.А. Перспективные технологии диагностирования элегазовых распределительных устройств [Текст] / Е.А. Марюшко, А.Г. Овсянников // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 1. – С. 17–22.

111 Марюшко, Е.А. Диагностирование комплектных распределительных элегазовых устройств (обзор зарубежных публикаций) [Текст] / Е.А. Марюшко, А.Г. Овсянников // Диагностика электрических установок: Материалы 9-го н.-пр. семинара Общ. Совета специалистов Сибири и Д. Востока. – Красноярск, Дивногорск: ОСС ДЭУ. – 2014. – С. 34 – 43.

112 Марюшко, Е.А. Разработка рекомендаций по проведению оперативной диагностики частичных разрядов в комплектных элегазовых распределительных устройствах [Текст] / Е.А. Марюшко, А.Г. Овсянников // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI междунар. н.-техн. конф., 9 – 13 ноября 2015, Иваново. – В 2 т. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2015. – Т 1. – С. 536 – 539.

113 Марюшко, Е.А. Оперативная регистрация частичных разрядов в КРУЭ [Текст] / Е.А. Марюшко, А.В. Виштибеев // Известия НТЦ Единой энергетической системы.– 2015.–№ 2 (73).–С. 64 – 71.

114 Марюшко, Е.А. Регистрация частичных разрядов в комплектных распределительных элегазовых устройствах [Текст] / Е.А. Марюшко, А.Г. Овсянников // Электро.– 2016. – № 1. – С. 31 – 36.

115 Cernak M. First Negative Corona Pulses in 70% N₂ + 30% SF₆ Mixture / M. Cernak, T. Kaneda, and T. Hosokawa //, Japanese J. Appl. Phys., Vol. 28, pp. 1989-1996, 1989.

116 Bartnikas R. On the Character of Different Forms of Partial Discharge and their Related Terminologies / R. Bartnikas and J.P. Novak // IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. 28, pp. 956-968, 1993.

117 Blalock T.V. Low Noise Wide-Band Amplification System for Acquiring Prebreakdown Current Pulses in Liquid Dielectrics / T.V. Blalock, A.L. Wintenberg, and M.O. Pace // IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. 24, pp. 641-647, 1989.

118 Kreuger F.H. Classification of Partial Discharges/ F.H. Kreuger, E. Gulski, and A. Krivda // IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. 28, pp. 917-931, 1993.

119 Okamoto T. Novel Partial Discharge Measurement Computer-aided Measurement. Systems / T. Okamoto and T. Tanaka //IEEE Trans. Elec. Insul. Vol. 21, pp. 1015-1016, 1986.

120 Fruth B. The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge Data/ B. Fruth and L. Niemeyer // IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. 27, pp. 60-69, 1992.

121 Van Brunt R.J. Method for Measuring the Stochastic Properties of Corona and Partial-Discharge Pulses / R.J. Van Brunt and S.V. Kulkarni // Rev. Sci. Instrum., Vol. 60, pp. 3012-3023, 1989.

122 Van Brunt R.J. System for Measuring Conditional Amplitude, Phase, or Time Distributions of Pulsating Phenomena/ R.J. Van Brunt and E.W. Cernyar // J. Res. Nat. Inst. Stand. and Tech., Vol. 97, pp. 635-672, 1992.

123 Kopf V. Possibilities to Improve the Sensitivity of PD-Measurements by Using Digital Filters/ V. Kopf and K. Feser // Proc. Int. Symp. on Digital Techniques in High-Voltage Measurements, Toronto, Canada, pp. 2-27-2-31, 1991.

124 Stefan M. Hoek, Uwe Riechert, Thomas Strehl, Kurt Feser, Stefan Thenbolen, New Procedures for Partial Discharge Localization in Gas-Insulated Switchgears in Frequency and Time Domain, XV International Symposium on High Voltage Engineering th University of Ljubljana, Elektroinštitut Milan Vidmar, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007 T7-547

125 ГОСТ 1516.3-96 «Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции»

126 Bacega W.R. Detection of partial discharges in SF6 circuit breakers at field / Bacega W.R., Tatizawa H., Bacega F., Castro A.F., Bottaro M. // Proc. 18th ISH, Seoul, 2013. – Paper PD-09. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

127 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.4.1191-03. – М.: Министерство здравоохранения РФ, постановление №10 от 19.02.2003.

128 Марюшко, Е.А. Проблемы эксплуатации и диагностирования вводов с RIP изоляцией [Текст] / Е.А. Марюшко, А.Г. Овсянников // Диагностика электрических установок: Материалы 9-го н.-пр. семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока. Красноярск, Дивногорск: ОСС ДЭУ. – 2014. – С. 51 – 59.

129 Марюшко, Е.А. Исследования внутренней структуры и диэлектрических характеристик RIP-изоляции вводов высокого напряжения [Текст] / Е.А. Марюшко, О.С. Ковалёв, А.Г. Овсянников [и др.] // Диагностика электрических установок: Материалы 9-го н.-пр. семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Дальнего Востока. Красноярск, Дивногорск: ОСС ДЭУ. - 2014. – С. 60 – 69.

130 Марюшко, Е.А. Проблемы эксплуатации и диагностирования вводов с RIP изоляцией [Текст] / Е.А. Марюшко, А.Г. Овсянников // Энергоэксперт. – 2014. – № 3. – С. 22 – 26.

131 Мосизолятор, официальный сайт. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mosizolyator.ru/> (Дата обращения: 01.03.2017).

132 Ботов, С.В. Влияние защитного реле КИВ-500 с ТПС на техническое состояние высоковольтных вводов с RIP-изоляцией [Текст] / С.В. Ботов, В.А. Русов // Энергоэксперт. – 2013. – № 1. – С. 18 – 21.

133 Johansson K. Modeling and Measurements of VFT Properties of a Transformer to GIS Bushing / K. Johansson, U. Gäfvert [и др.] // Proceedings of the 43rd CIGRE Session, Paris, 2010. – Paper A2 – 302. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

134 IEC 62217 (2012). Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use – General definitions, test methods and acceptance criteria [Текст]. – Geneva, IEC Central office. – 2012. – 52 p.

135 Koch, M. Interpretation of the Dielectric Response of Instrument Transformers, Bushings, Cables, Rotating Machines and Power Transformers / M. Koch, S. Raetzke, M. Krueger // Proc. 17th ISH, Hannover, 2011. – Paper F – 083. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

136 MEGGER IDAX 300 Анализатор состояния изоляции трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electropergam.ru/idax300-megger.html> (Дата обращения: 01.03.2017).

137 Серафим Николаевич Журков (к шестидесятилетию со дня рождения) // Успехи физических наук, 1965, том 87, вып. 2. – С. 366 – 372.

138 McGrail, T. Asset Management: Power Transformer Fleet Condition Assessment and Risk Management / T. McGrail, K. Elkinson // Proc. 18th ISH, Seoul, 2013. – Paper OG1-02. – [Электронный ресурс]. – 1 электрон.-опт.диск (CD-ROM).

139 Овсянников, А.Г. Изоляция конденсаторного типа. Диагностирование по характеристикам частичных разрядов [Текст] / А.Г. Овсянников, Р.С. Арбузов, Е.А. Марюшко // Новости электротехники. – 2015. – № 5. – С. 43–45.

140 Овсянников, А.Г. Пространственно – временные и энергетические характеристики частичных разрядов в воздушных полостях твердых диэлектриков [Текст] / А.Г. Овсянников // Научный вестник НГТУ. – 1998. – № 2 (5). – С. 123 – 135.

141 Кузин, П. В. Наладка элегазового оборудования [Текст] / П.В. Кузин, И.А. Якобсон. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 112 с.

Приложение А

Характеристики, схема и компоновка КРУЭ 220 кВ на подстанции «Власиха» 220 кВ»

номинальные параметры согласно ПЭС		
номинальный ток шины	$I_{НОМ}$	2000А
номинальный ток трансформатора	$I_{НОМ}$	2000А
номинальный ток фидер	$I_{НОМ}$	2000А
номинальная частота	$F_{НОМ}$	50Гц
ток короткого замыкания	I_T	25кА
продолжительность	$t_{кз}$	3с
номинальное напряжение	$U_{Н.Р}$	245кВ
напряжение при промышленной частоте	U_d	460кВ
грозовой импульс напряжения	U_p	1050кВс
пиковое ток	I_d	63кА
данные значения действительны для всех модулей КРУ		

Рисунок А1 – Табличка с техническими характеристиками КРУЭ 220 кВ

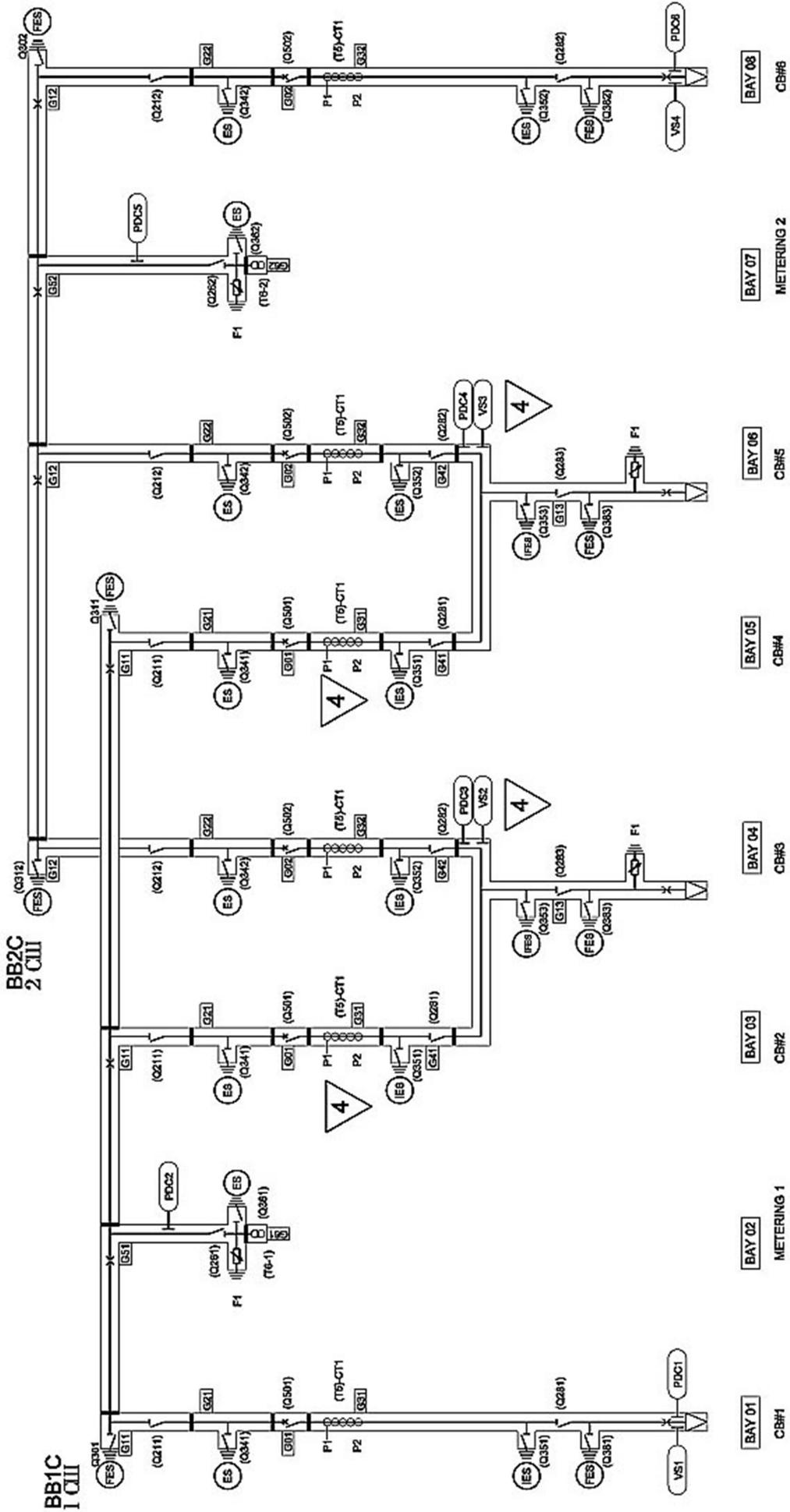
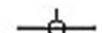
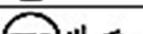
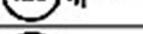
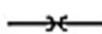
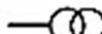
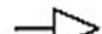
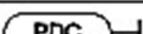
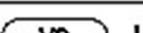
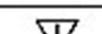
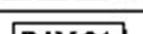


Рисунок А2 – Электрическая схема КРУЭ 220 кВ

	GB	RUSSE
(Q50) ...	INTERNAL DESIGNATION CUSTOMER'S DESIGNATION	обозначения внутренние заказчика
	CIRCUIT-BREAKER	выключатель
	DISCONNECTOR	разъединитель
	BUSBAR	борные шины
	CURRENT TRANSFORMER	трансформатор тока
	VOLTAGE TRANSFORMER	трансформатор напряжения
	MAINTENANCE EARTHING SWITCH	заземлитель эксплуатационный
	FAST EARTHING SWITCH	заземлитель быстродействующий
	INSULATED MAINTENANCE EARTHING SWITCH	заземлитель эксплуатационный изолированный
	INSULATED FAST EARTHING SWITCH	заземлитель изолированный быстродействующий
	REMOVABLE LINK	съемная перемычка
	TRANSFORMER CONNEXION	соединение трансформатора
	CABLE CONNEXION	кабельный ввод
	SURGE ARRESTER	ОПН
	PARTIAL DECHARGE COUPLER	датчик частичных разрядов
	VOLTAGE SENSOR	датчик напряжения
	MODIFICATION	изменения
	GAZ PARTITIONING	секционирование газовых объемов
	AREVA NUMBERING	обозначения ОСУМО

ограничитель перенапряжений					
СОГЛАСНО IEC 60099-4					
4	ячейка	обозначение	Uc	It	класс разряда
	3-5	PSA192F	154	20	5

Рисунок А3 – Условные обозначения элементов схемы КРУЭ

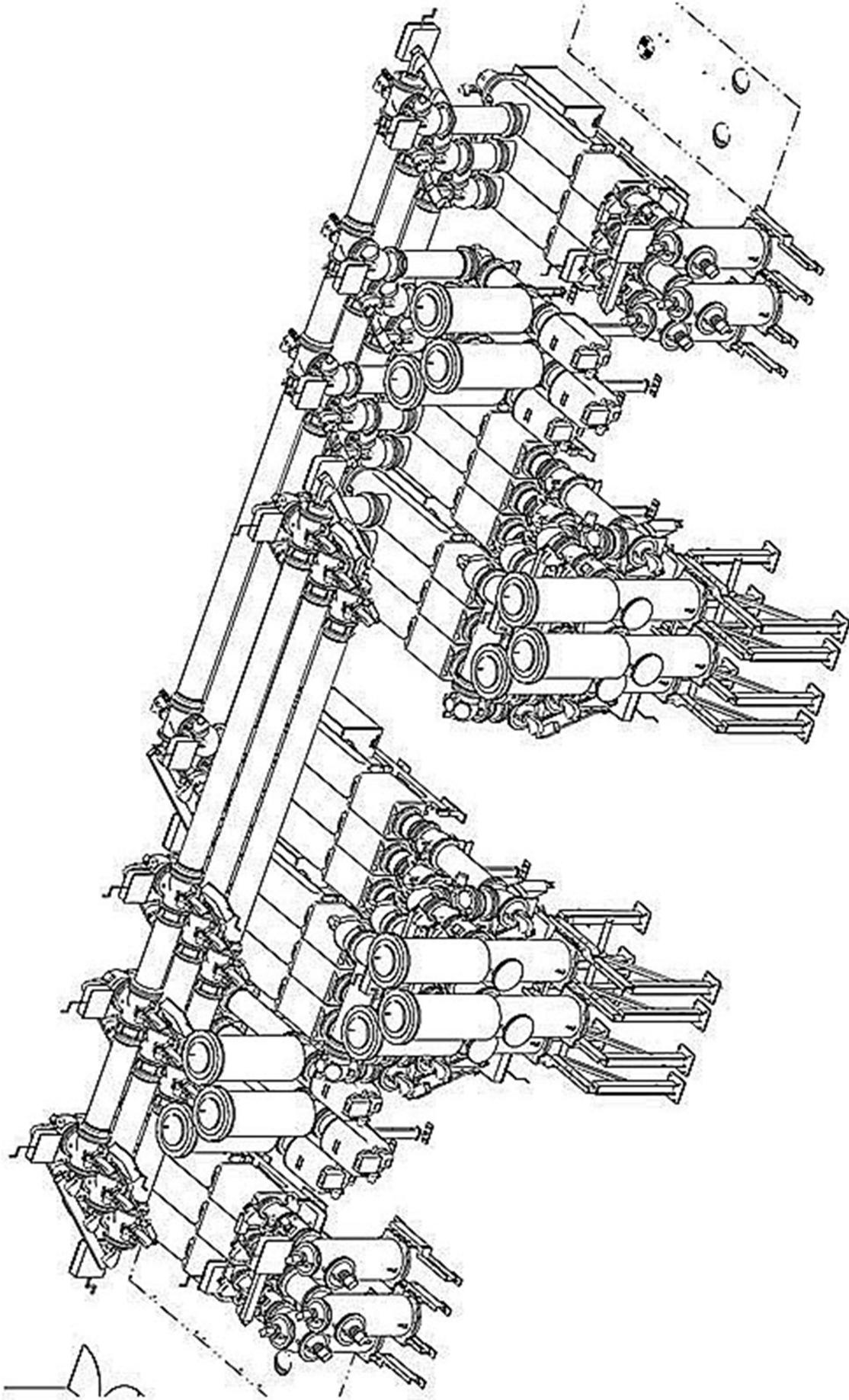


Рисунок А4 – Компонетка КРУЭ 220 кВ, ПС «Власиха»

Приложение Б
Копии сопроводительных документов

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель главного инженера филиала

АО «Электросетьсервис ЕНЭС»

СПБ «Электросетьремонт»



А.В. Шелепов

внедрения результатов диссертационной работы Марюшко Егора Андреевича на тему «Метод экспресс диагностики комплектных элегазовых распределительных устройств по характеристикам частичных разрядов»

г. Новосибирск

7 февраля 2017 г.

Диссертационная работа Марюшко Е.А. рассмотрена комиссией в составе:

Председатель:

Начальник службы диагностики маслonaполненного оборудования, к.т.н. :- Живодерников С.В.

Члены комиссии:

- инженер 1-й категории, к.т.н. - Шиллер О.Ю.;
- главный специалист ПТС - Масленников А.Л.

Комиссия рассмотрела выводы и рекомендации диссертации Марюшко Е.А., представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук и пришла к следующим выводам:

1 Возможность применения предлагаемого метода была показана Марюшко Е.А на примере при обследовании КРУЭ 220 кВ. Было конкретизировано место нахождения источника частичных разрядов, с интенсивностью не превышающей 5 пКл.

2 Предложенные подходы использованы при плановых работах сотрудниками Новосибирского участка СПБ «Электросетьремонт» на ПС «Власиха» Западно-Сибирского ПМЭС при измерении частичных разрядов под рабочим напряжением. Всего обследовалось $4 \times 3 = 12$ кабелей однофазного исполнения типа 2XS(FL)2Y-FR 1x400 RM/265 127/220 kV с изоляцией из сшитого полиэтилена длиной $2 \times 3 \times 75$ м и $2 \times 3 \times 105$ м, отходящих от КРУЭ 220 кВ. При этом в 11 фазах кажущийся заряд не превышал допустимого уровня, а в одной из фаз (фаза В присоединения к ВЛ-237), он был близок к 60 пКл, что превышает установленный производителем кабеля предельно допустимый уровень 50 пКл. Поскольку кабель в рабочем состоянии соединён с КРУЭ, важно было определить, где конкретно находится очаг ЧР опасной интенсивности.

3 Дополнительное обследование с использованием данных Марюшко Е.А., позволило установить, что источник частичных разрядов находится в концевой муфте фазы **В** присоединения кабеля к ВЛ-237, что подтверждено дополнительным тепловизионным обследованием. Полученный в итоге результат позволил отказаться от испытаний кабеля высоким напряжением от постороннего источника. По принятой в ПАО ФСК ЕЭС методике испытания должны проводиться с использованием испытательной установки HIGHVOLT WRV-74/180Т. По приближённым оценкам затраты на проведение испытаний (аренда установки, её транспортировка на ПС, вывод кабеля в ремонт, проведение испытаний и обратная сборка схемы) составили бы около 400 тыс.руб.

4 Таким образом, за вычетом стоимости дополнительного тепловизионного обследования концевой кабельной муфты, экономический эффект от использования результатов диссертационной работы Марюшко Е.А., только в этом конкретном случае составил 320 тыс. руб.

Председатель комиссии

С.В. Живодерников

Член комиссии

О.Ю. Шиллер

Член комиссии

А.Л. Масленников

ASSOCIATION DES INVENTEURS ET FABRICANTS FRANÇAIS

CONCOURS LÉPINE
CONFÉRENCE INTERNATIONALE DE L'INVENTION
DE PARIS

Diplôme

2013
Médaille A.S.F.G.

décerné à Egor Karyushko

pour Roule analogique de fibre optique pour la mesure

Le Président de l'Association

Le Secrétaire Général

Le Président du Jury

1986

