

На правах рукописи



МАРЮШКО Егор Андреевич

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

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Овсянников Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: **Киншт Николай Владимирович**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник

Вдовико Василий Павлович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Инжиниринговая компания Общество с ограниченной ответственностью «Энергетика, Микроэлектроника, Автоматика», главный специалист

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится: «15» июня 2017 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте

http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=16301

Автореферат разослан «___» апрель 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.173.01,
доктор технических наук, доцент



А. Г. Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности.

В современной электроэнергетике 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.

Вместе с тем 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 в процессе эксплуатации оборудования является единственным способом предотвратить отказы 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.

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 изоляцией 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, актуальны.

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 наличия 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 регистрации 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. 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 молодежной секции 46-й сессии СИГРЭ, Париж, Франция.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и степень её разработанности, сформулирована цель, основные задачи и методы исследования, отражены научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** произведён обзор публикаций, посвященных типичным дефектам КРУЭ и методам их обнаружения:

- утечки элегаза;
- загрязнение элегаза металлическими или диэлектрическими частицами;
- загрязнение элегаза продуктами горения дуги;
- шероховатости, выступы и заусенцы на токоведущих частях;
- внутренние дефекты опорной изоляции: газовые полости, отслоения или трещины.

По результатам обзора автор пришёл к следующим выводам.

~ 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.

~ 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, но 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 эффективен при поиске 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 указанные выше задачи исследований.

Глава 2 посвящена разработке метода экспресс регистрации ЧР без вывода КРУЭ из эксплуатации и вмешательства в его конструкцию. Особое внимание уделено ключевым этапам диагностирования, с которыми может столкнуться персонал при выполнении измерений, и методам их решения.

- а) Анализ конструктивных особенностей КРУЭ.
- б) Выбор типа и места подключения датчиков ЧР.
- в) Отстройка от внешних и внутренних помех.
- г) Определение места расположения источника ЧР.
- д) Определение возможных причин возникновения ЧР.
- е) Определение степени опасности ЧР.
- ж) Формирование рекомендаций по дальнейшим действиям для эксплуатирующей организации.

а) *Анализ конструктивных особенностей КРУЭ.*

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, трёхфазное или однофазное. Конструкция влияет на характер распространения сигнала, степень его затухания, а также количество вводов установленных в герметичном корпусе.

~ Конструктивное исполнение соединений модулей КРУЭ. Если соединение выполнено с выходом герметичного опорного изолятора на поверхность корпуса, то конструкция позволяет устанавливать накладные электромагнитные высокочастотные (ВЧ) или ультравысокочастотные (УВЧ) датчики ЧР. Если оболочка КРУЭ цельнометаллическая, то применение ВЧ датчиков становится невозможным, а УВЧ – проблематичным в части интерпретации выходных сигналов.

~ Наличие радиопрозрачных окон в оболочке КРУЭ позволяет устанавливать накладные электромагнитные ВЧ или УВЧ датчики ЧР.

~ Наличие вводов «кабель – элегаз». На поводок заземления ввода могут быть установлены датчики ЧР, например высокочастотные трансформаторы тока (ВЧТТ).

~ Наличие вводов «воздух – элегаз» с изоляцией конденсаторного типа. Современные вводы с бумажно-масляной или RIP-изоляцией оборудованы измерительным выводом (тест-выводом), предназначенным для измерений диэлектрических характеристик изоляции ввода. К нему могут быть подключены и приборы регистрации сигналов ЧР.

~ Наличие встроенных датчиков ЧР (индуктивные, ёмкостные, электромагнитные).

б) *Выбор типа и места подключения датчиков частичных разрядов.*

На основе анализа конструктивных особенностей для диагностируемого КРУЭ составляется перечень мест, пригодных для регистрации ЧР, и типов датчиков:

- ~ встроенных ёмкостных датчиков ЧР;
- ~ высокочастотных трансформаторов тока (ВЧТТ) на заземляющих поводках экранов кабелей присоединений, заземлении конусов кабельных вводов 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.

Для обеспечения максимальной точности в определении места положения источника сигнала ЧР и качественной регистрации его параметров в корпорации Toshiba предложено делать датчики ЧР, встроенные в оболочку каждого газоизолированного отсека КРУЭ. Такое расположение обеспечивает прямую регистрацию сигнала от ЧР без искажения конструктивными элементами КРУЭ и однозначное определение места расположения источника ЧР за счёт сравнения амплитуд сигналов, зарегистрированных соседними датчиками. Суть 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, потому что установка встроенных датчиков ЧР, может быть выполнена только на заводе изготовителе, а использование внешних датчиков возможно только в местах расположения герметичных опорных изоляторов и диэлектрических окон в оболочке КРУЭ.

Для контроля минимально возможного объёма и обеспечения локации источника сигнала необходимо, чтобы участок КРУЭ, 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» или «воздух – элегаз». В результате конструкция будет разделена на набор линейных отрезков шин, каждый из которых ограничен датчиками ЧР с обоих концов.

При проведении синхронных измерений сигнал, возникший внутри такого отрезка, будет зафиксирован в первую очередь концевыми датчиками данного сегмента КРУЭ. Точное место расположения источника сигнала будет определено по разности времени прихода сигнала к датчикам. Реализация данной измерительной схемы для одной фазы КРУЭ, принципиальная схема приведена на рисунке 1, потребует установки: четырёх высокочастотных трансформаторов тока на заземляющих поводках кабельных вводов и шести накладных электромагнитных УВЧ датчиков в точках ветвления шин.

Расчёт оптимального количества датчиков ЧР, необходимого для эффективного контроля всего внутреннего объёма КРУЭ выполняется по формуле 1

$$D_{\text{ЧР}} = 3 \cdot N_{\text{вв}} + T_{\text{КРУЭ}} \cdot N_{\text{ветв}}, \quad (1)$$

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.

Предложенный подход требует в 3-4 раза меньшее количество датчиков, чем при контроле каждого газоизолированного отсека КРУЭ.

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.

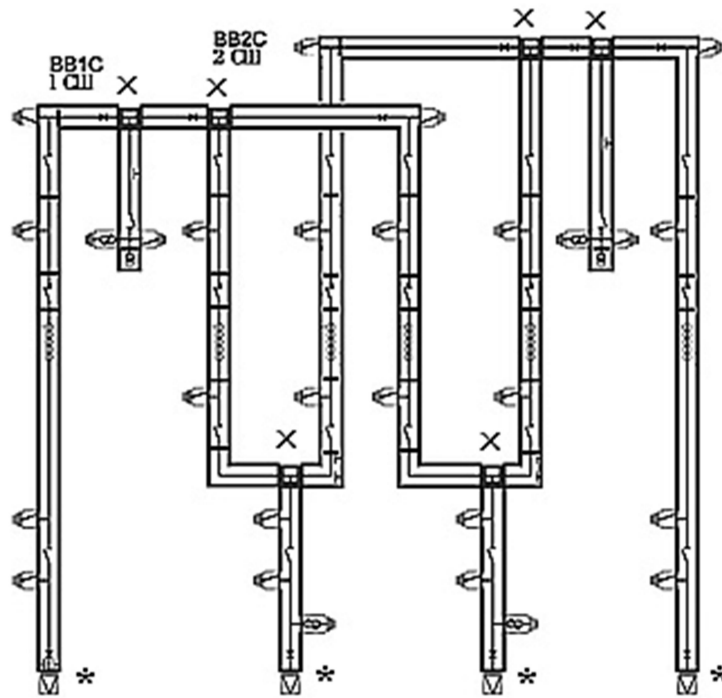


Рисунок 1 – Однолинейная схема КРУЭ 220 кВ: *- ВЧТТ на вводах;
 ×– датчики на герметичных опорных изоляторах в местах ветвления,

В этих случаях измерительная схема может быть составлена в соответствии с одним из вариантов, приведённых в таблице 1.

Таблица 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 аппаратуре	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.

в) Методы снижения внешних и внутренних помех.

Одним из главных препятствий при получении достоверного сигнала являются электромагнитные помехи. Для защиты от помех могут быть приняты известные аппаратные и программные методы. В числе аппаратных методов предусматривается:

- ~ использование активных и пассивных фильтров;
- ~ защита от сигналов короны на шинах присоединений на открытом распределительном устройстве (фазовая селекция сигналов ЧР);
- ~ использование помехового канала для селекции сигналов ЧР путём блокировки измерений на время действия эфирной помехи или корректировки результата измерений;
- ~ использование автономного источника питания регистрирующей аппаратуры и для защиты от помех по питающей сети.
- ~ подавление помех от высокочастотной связи по проводам присоединённых линий электропередачи. В данной работе предложена схема фильтрации низкочастотного сигнала с помощью отрезка кабеля длиной порядка одного метра с заземлённой центральной жилой на конце.
- ~ использование оптических каналов передачи сигнала.

Для решения задачи защиты передаваемого сигнала от наведённых помех автором разработан волоконно-оптический измерительный тракт (ВОИТ), функциональная схема которого приведена на рисунке 2. 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.

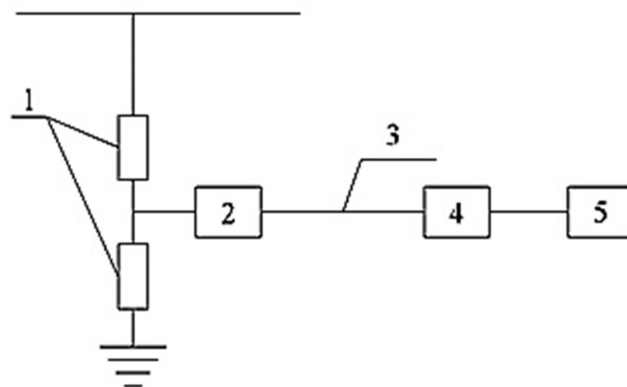


Рисунок 2 – Схема применения волоконно-оптического измерительного тракта:
1 – датчик, 2 – передатчик, 3 – ВОЛС,
4 – приёмник, 5 – регистрирующий прибор

г) Определение места расположения источника ЧР.

Во-первых, нужно определить находится ли 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 шин, подключенных через вводы «воздух-элегаз». Зачастую в окружающих объектах так же находятся источники ЧР и короны.

Второй задачей локации является определение расположения источника ЧР внутри КРУЭ. Оно производится на основе разности времени прихода сигнала на различные датчики измерительной схемы (рисунок 3).

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) определяется расстояние до первого датчика,

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

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.

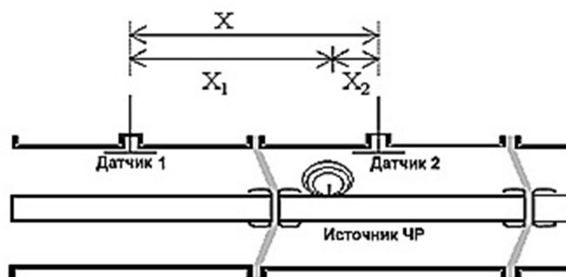


Рисунок 3 – Схема расчёта места расположения источника ЧР в КРУЭ

д) *Определение возможных причин возникновения ЧР и степени опасности для дальнейшей эксплуатации оборудования.*

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

Таблица 2 – Причины возникновения ЧР

Очаг ЧР	Причина дефекта
Расположен в районе соединения отсеков	Характерным источником ЧР являются микрополости или микротрещины в герметичных опорных изоляторах разделяющих отсеки.
Расположен в отсеке с коммутационным оборудованием (выключатель, разъединитель, заземлитель).	Потенциальным источником ЧР являются металлические частицы, образующиеся в результате эрозии контактов и механического износа подвижных частей.
Расположен в районе модуля, содержащего трансформатор тока или напряжения.	Потенциальный источник ЧР - повреждённая изоляция измерительного трансформатора тока или напряжения.
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 свободные металлические частицы.

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

~ Менее 10 пКл – 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 – 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.

Для градуировки схемы регистрации частичных разрядов предлагается использовать имитаторы ЧР в виде полых стеклянных микросфер (ЧР возникают внутри сферы и не воздействует на элегаз) или полосковой линии, представляющую собой тонкую проводящую полосу, смонтированную, на внутренней стенке оболочки КРУЭ, от которой через газонепроницаемый высокочастотный разъём выполнен вывод за пределы оболочки.

Глава 3 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.

КРУЭ 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.

В качестве изоляции используется элегаз SF₆, под давлением 0,63 МПа (6,3 Бар), при температуре 20°С. Газоизолированные отсеки КРУЭ разделены между собой герметичными опорными изоляторами. Опорный изолятор устанавливается в выемку одного из отсеков и прижимается к нему с помощью фланца, затем происходит присоединения следующего отсека.

КРУЭ оборудовано встроенными датчиками напряжения и датчиками ЧР.

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.

Общая оценка технического состояния КРУЭ включающая в себя внешний осмотр, оценку электромагнитной обстановки, измерение напряженности магнитного поля и тепловизионное обследование не выявили отклонений в работе оборудования.

Измерение активности ЧР было выполнено с помощью высокочастотных трансформаторов тока RFCT-4 производства компании «Димрус» и цифрового осциллографа Tektronix DPO3014. На КРУЭ 220 кВ были выполнены следующие измерения:

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

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

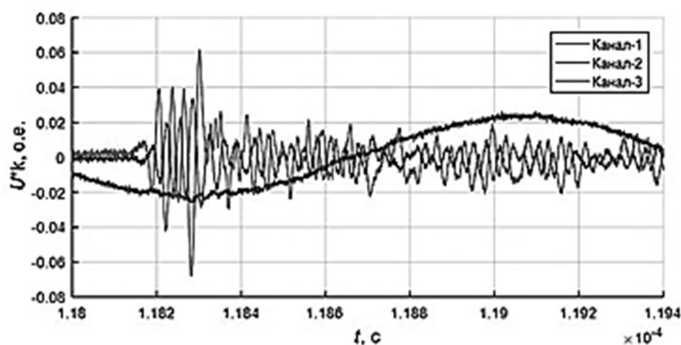


Рисунок 4 – Осциллограмма сигналов, зарегистрированных на кабельном вводе АТ-2, ф. «А», КРУЭ 220 кВ:

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

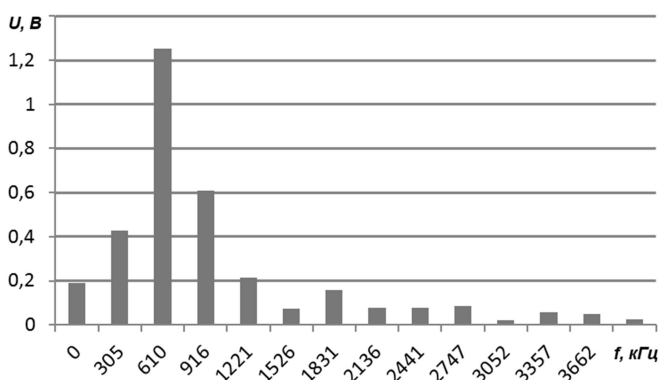


Рисунок 5 – Спектр частот сигнала, зарегистрированного на заземлении экрана кабеля связи с АТ-2 ф., «А»

На заземлении экрана кабеля, канал 1 (рисунок 4), зарегистрирован синусоидальный сигнал амплитудой до одного вольта. Анализ амплитудно-частотного спектра (рисунок 5) выявил гармонику с частотой 610 кГц, которая 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. Сигналы канала 2 и 3 имеют схожую форму, однако кривая соответствующая заземлению диагностического разъёма (канал 3) имеет запаздывание и меньшую амплитуду сигнала. Таким образом, наиболее подходящим местом подключения датчиков регистрации ЧР (ВЧТТ) в КРУЭ были признаны заземляющие поводки конусов вводов «кабель – элегаз».

б) 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.

Анализ полученных осциллограмм выявил на фазе «А», кабельного ввода от автотрансформатора АТ-1 сигналы симметричные по полярности, что является одним из признаков внутренних ЧР.

в) 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.

Определение места расположения источника сигнала, внутри диагностируемого объект было выполнено с помощью время-пролетного(волнового) метода.

Для первого отрицательного пика, на каждом канале были определены:

- ~ абсолютное значение времени появления пика;
- ~ время появления последующих пиков относительно первого;
- ~ амплитуда пика.

Результаты измерений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – 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

Расчёт времени пробега сигнала и расстояние от источника до датчика 2 выполнено по (3, 4)

$$T_2 = \frac{L/c + \Delta T}{2}, \quad (3)$$

$$X_2 = \frac{L + c \cdot \Delta T}{2}. \quad (4)$$

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 6 приведена схема КРУЭ, на которой отмечен район расположения источника сигнала.

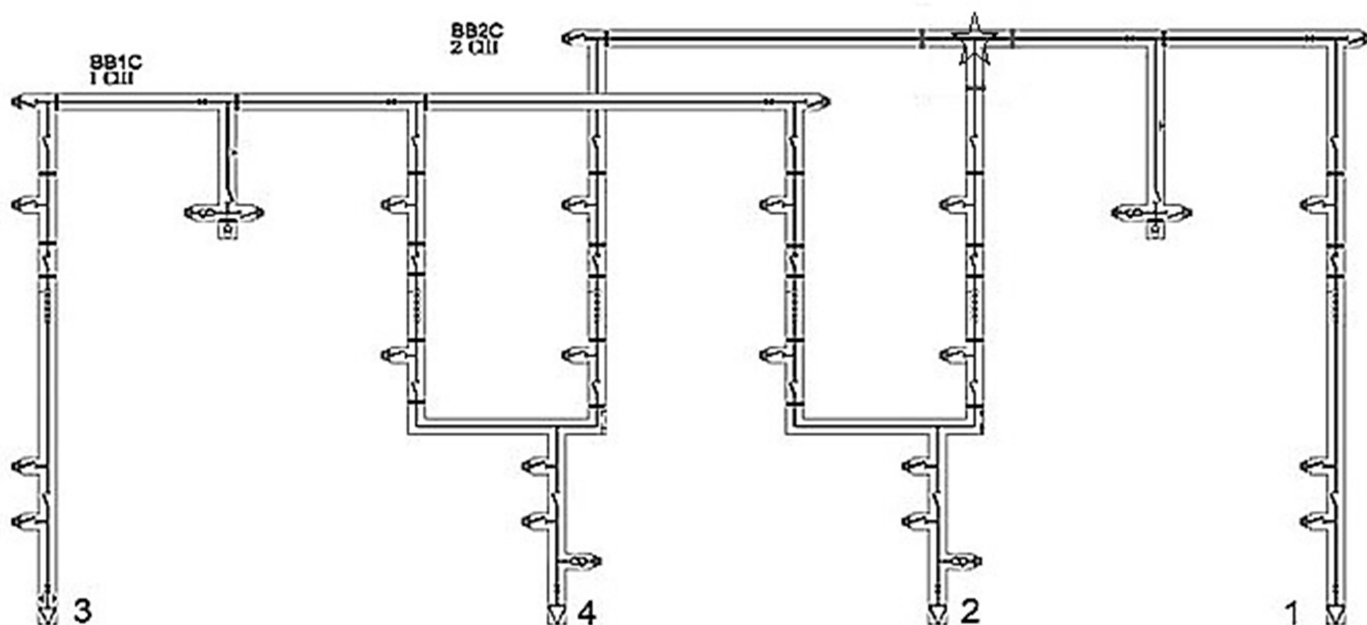


Рисунок 6 – Однолинейная схема КРУЭ 220 кВ: звёздочкой выделено место расположения очага частичных разрядов

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 источники ЧР.

Определение типа дефекта и степени его опасности.

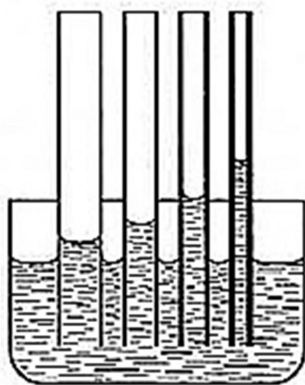
Рассчитанный по осциллограмме кажущийся заряд ЧР составляет 4,98 пКл.

На основе проведённых измерений можно сделать следующие выводы.

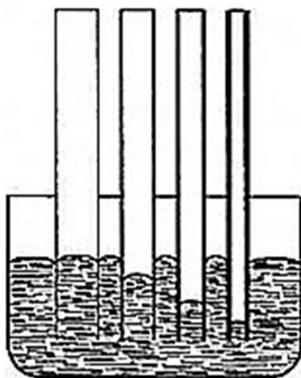
- ~ Источником ЧР является незначительный выступ на токопроводе, возможно присутствие свободных диэлектрических частицы в разрядном промежутке.
- ~ Кажущийся заряд ЧР не превышает 5 пКл, т.е. меньше допустимого для оборудования уровня, поэтому обнаруженный дефект не представляет опасности.
- ~ Диагностируемое оборудование находится в хорошем техническом состоянии, дальнейшая эксплуатация возможна без ограничений.

Глава 4 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 – 10 гг. Указанный тип вводов наиболее перспективен для применения в КРУЭ, поэтому представляло интерес разобраться в возможных причинах отказов изоляции. В ходе исследований были проведены экспериментальные оценки пористости материала пропитки и оценки напряжённостей электрического поля на уравнивающих обкладках, измерены характерные напряжённости и величины кажущегося заряда в образце изоляции ввода 110 кВ.

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



а



б

Рисунок 7 – Поведение смачивающей (а) и несмачивающей (б) жидкостей в капиллярах разного диаметра



Рисунок 8 – Внешний вид образца RIP изоляции (а) и проникновение красящей жидкости (б) по сквозному капилляру (показан стрелкой)

капилляр, будут в нём подниматься (рисунок 7,а), а не смачивающие – опускаться (рисунок 7,б).

Проникновение красящей жидкости. Цель данного опыта: установить наличие сквозных капилляров. Опыт проводился по методике п.9.4.1 стандарта МЭК 62217. Как правило, в каждом образце имелся один сквозной капилляр (рисунок 8), а в некоторых образцах их было несколько. Высокая скорость проникновения красящей жидкости (около 1 мм/с) свидетельствовала о малых диаметрах капилляров.

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.

Метод основан на уравнении Уошборна, для определения диаметра пор D

$$D = \frac{-4\sigma \cdot \cos\theta}{\Delta P}, \quad (5)$$

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

$$S_{уд} = \frac{1}{\sigma \cdot \cos\theta} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta V_p, \quad (6)$$

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

Результаты измерений на одном из образцов приведены на рисунке 9, в виде дифференциального распределения капилляров по диаметрам.

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 уравнильных обкладок также могут восприниматься аппаратурой как капилляры большого диаметра.

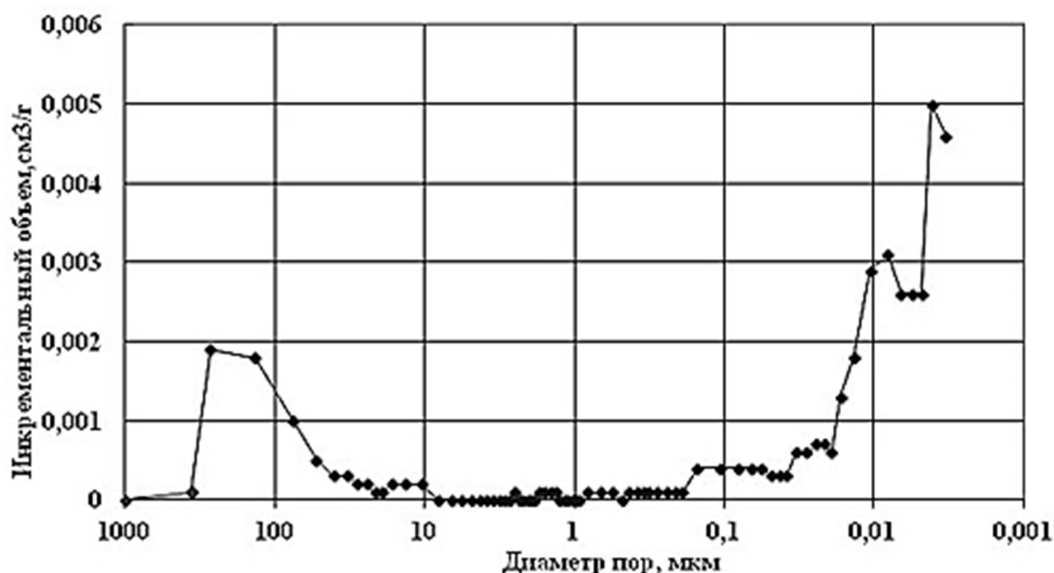


Рисунок 9 – Зависимость инкрементального объема от диаметра капилляров (дифференциальное распределение)

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 наличие мелких капилляров приводит

к большей гигроскопичности материалов.

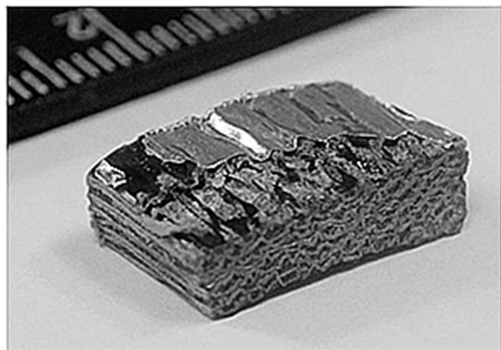


Рисунок 10 – Внешний вид испытываемого образца

Косвенный признак отслоений просматривался на одном из образцов изоляции с практически целой фольговой обкладкой (рисунок 10). Очевидно, что при хорошей адгезии смолы к обкладке, она не осталась бы столь целой.

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.

Влияние неровностей обкладок на напряжённость электрического поля. Неровности обкладок возникают из-за неровностей крепированной бумаги. Расчёты электрического поля проводились в модели двух слоёв изоляции, разделённых неровной обкладкой. Пример картины электрического поля в такой модели приведён на рисунке 11.

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.

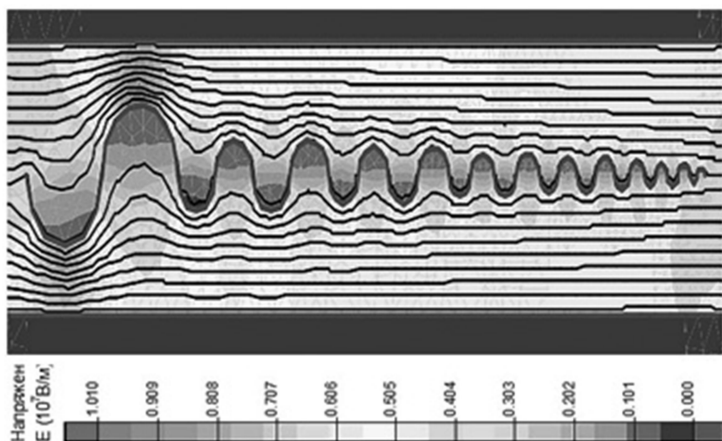


Рисунок 11 – Картина поля в двух слоях изоляции с бугристым средним электродом (обкладкой)

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.

Расчёты 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 осуществляет подзарядку общей ёмкости изоляции и оказывается доступной для регистрации. Соответственно, кажущийся заряд ЧР, и без того малый по величине, дополнительно ослабляется, что и приводит к потере чувствительности регистрации ЧР. Это обстоятельство сильно усложняет оценку качества изоляции при высоковольтных испытаниях и диагностировании изоляции.

Расчёты сигналов ЧР выполнены в программном комплексе для расчёта переходных процессов “ЕМТР” для двух схем (рисунок 12), соответствующих разным местам расположения очага ЧР.

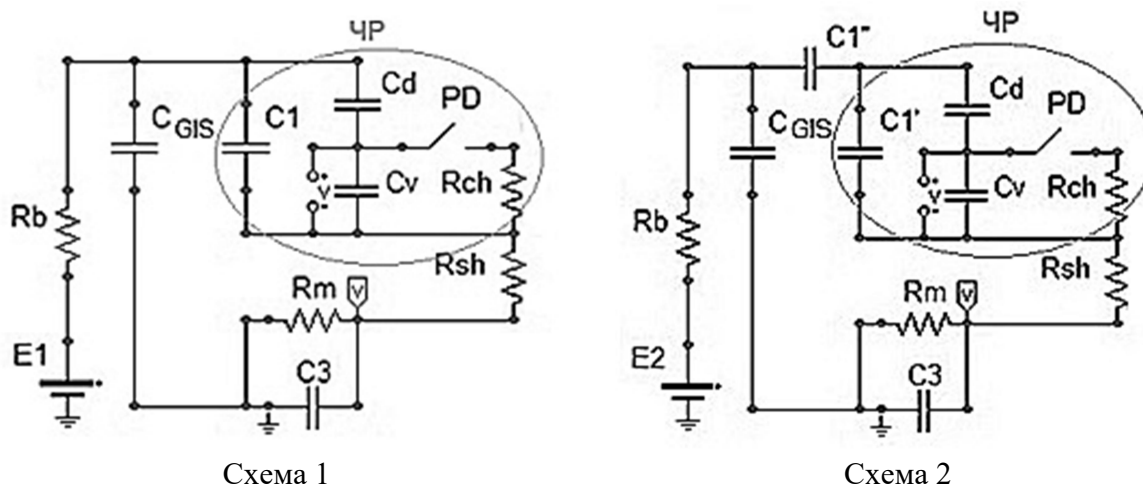


Рисунок 12 – Схемы для расчётов сигналов частичных разрядов

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 как

$$C1 = C1'/15 = 7500/15 = 500 \text{ пФ} \quad (7)$$

$$C1 = C1' \cdot C1'' / (C1' + C1'') = 536 \cdot 7500 / 8036 \approx 500 \text{ пФ} \quad (8)$$

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 . Действие ЧР имитировалось идеальным ключом и сопротивлением R_{ch} разрядного канала. Параметры остальных элементов (таблица 4) подобраны таким образом, чтобы истинный заряд ЧР оставался неизменным в обоих расчётных случаях (9).

$$Q = U_v \cdot (C_v + C_d) = 100 \cdot (45 + 5) \cdot 10^{-1} = 5 \text{ нКл} \quad (9)$$

Расчётные осциллограммы токов ЧР приведены на рисунке 13,а, на рисунке 13,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 R_{sh}). Этот ток является суммой токов, протекающих через ёмкость изоляции последней обкладки ввода, $C3$, и через измерительное сопротивление, R_m .

Таблица 4 – Обозначения и параметры элементов расчётных схем

Обозначение	Наименование	Номинал	Начальные условия
PD	Ключ, имитирующий ЧР		
C_v	Собственная ёмкость включения с ЧР	45 пФ	$U_0 = 100 \text{ В}$
C_d	Ёмкость включения на электроды	5 пФ	$U_0 = 900 \text{ В}$
R_{ch}	Сопротивление канала ЧР	100 Ом	
C_{tr}	Ёмкость КРУЭ	5 нФ	$U_0 = E$
$C1$	Ёмкость основной изоляции ввода	500 пФ	
$C1'$	Ёмкость между одной парой обкладок	7.5 нФ	$U_0 = 1 \text{ о.е.}$
$C1''$	Ёмкость всех остальных слоёв изоляции ввода	536 пФ	$U_0 = 14 \text{ о.е.}$
$C3$	Ёмкость изоляции последней обкладки ввода относительно земли	2 нФ	$U_0 = 0$
R_{sh}	Сопротивление шунта	0.1 Ом	
R_m	Измерительное сопротивление	50 Ом	$U_0 = 0$
R_b	Волновое сопротивление шин ПС	250 Ом	
$E1, E2$	Напряжения на шинах	$E1 = 1 \text{ о.е.} = 1 \text{ 000 В}$ $E2 = 15 \text{ о.е.} = 15 \text{ 000 В}$	

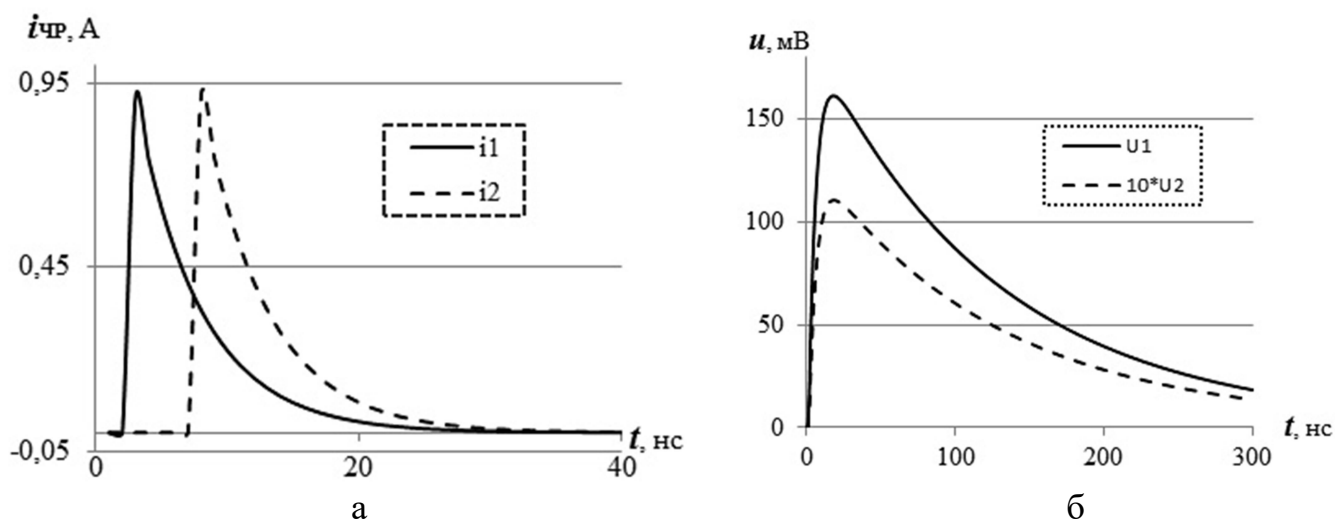


Рисунок 13 – Расчётные осциллограммы токов ЧР (а) и импульсов напряжения на измерительном сопротивлении (б)

Результаты расчётов, приведённые в таблице 5, подтверждают «шунтирующий» 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 5 – 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

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 интенсивности 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. В КРУЭ с кабельными присоединениями совместное применение обеспечивает разделение сигналов ЧР в изоляции кабелей (муфт) и в КРУЭ. Акустический метод принципиально непригоден для оценки интенсивности ЧР, но эффективен при поиске места расположения очагов ЧР.

3. 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.

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

5. Для очистки сигнала от низкочастотных помех предложен и опробован фильтр верхних частот на основе отрезка коаксиального кабеля, замкнутого на заземлённом конце его экрана.

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

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

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

9. 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.

10. 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.

11. 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.

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

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

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Марюшко Е.А. Волоконно-оптический измерительный тракт // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 4. – С. 140.

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

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

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

Патенты:

5. Пат. 131525 Российская Федерация, МПК G08C23/06. УСТРОЙСТВО ПЕРЕДАЧИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ / Марюшко Е.А., 2013

Научные публикации в других изданиях:

6. 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.

7. Марюшко, Е.А. Проблемы эксплуатации и диагностирования вводов с R1P изоляцией / Е.А. Марюшко, А.Г. Овсянников // Энергоэксперт. – 2014. – № 3. – С. 22 – 26.

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

9. Марюшко, Е.А. Диагностирование комплектных распределительных элегазовых устройств (обзор зарубежных публикаций)/ 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.

10. Марюшко, Е.А. Проблемы эксплуатации и диагностирования вводов с R1P изоляцией / 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.

11. Марюшко, Е.А. Исследования внутренней структуры и диэлектрических характеристик R1P-изоляции вводов высокого напряжения / 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.

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

13. Марюшко, Е.А. Разработка рекомендаций по проведению оперативной диагностики частичных разрядов в комплектных элегазовых распределительных устройствах /

Е.А. Марюшко, А.Г. Овсянников // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международ. 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.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л., тираж 100 экз.
заказ № 571 подписано в печать 10.04.2017 г.