

На правах рукописи



БУНЗЯ Александр Андреевич

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ  
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ  
УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС) Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор  
Сухогузов Александр Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Черемисин Василий Титович

кандидат технических наук, доцент  
Осотов Вадим Никифорович

Ведущая организация – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится «18» февраля 2011 года в 14.00 часов в ауд. 283 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 при Уральском государственном университете путей сообщения (УрГУПС) по адресу: 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66. Тел./факс: (343) 358-55-10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета, с авторефератом – в сети Интернет на сайте [www.usurt.ru](http://www.usurt.ru)

Автореферат диссертации разослан «17» января 2011 г.

Отзывы на автореферат, в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета по почте и по факсу (343) 245-31-88.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Асадченко В. Р.

## ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время срок эксплуатации большей части силового электрического оборудования тяговых подстанций России составляет не менее 25 лет, то есть больше нормативного срока службы. Замена оборудования связана со значительными финансовыми затратами и происходит крайне медленно. Длительная эксплуатация электрооборудования приводит к ухудшению диэлектрических свойств высоковольтной изоляции и отказам, которые могут вызвать нарушение графика движения поездов, внеплановые ремонты оборудования и непредвиденные капитальные затраты на его восстановление.

В сложившихся условиях возрастает роль методов профилактического контроля состояния электрической изоляции. Однако периодичность профилактических испытаний силового электрического оборудования зависит от его типа и может колебаться от одного года до нескольких лет. Становится очевидным, что в промежуточный период между испытаниями электрическая изоляция оборудования остается практически бесконтрольной. Более того, применяемые сегодня методы профилактических испытаний малоэффективны и технически несовершенны. Наиболее распространенный метод испытания повышенным напряжением способен выявить только грубые дефекты, проявляющие себя в процессе испытаний в виде сквозного пробоя. Другие дефекты, часто скрытые от наблюдателя и не проявившиеся при профилактических испытаниях, в процессе эксплуатации могут развиться до опасных и вызвать отказ оборудования. Несмотря на существующую систему профилактических испытаний, значительная доля отказов силового электрооборудования тяговых подстанций связана с пробоем электрической изоляции в процессе эксплуатации.

В связи с этим актуальность работы определяется необходимостью разработки и внедрения систем непрерывного контроля состояния электрической изоляции, обладающих достаточной технической и экономической эффективностью.

**Целью диссертационной работы** является повышение надежности электрической изоляции силового оборудования тяговых подстанций. Для достижения указанной цели были поставлены **следующие задачи**.

1. Исследование характеристик частичных разрядов (ЧР) в электрической изоляции устройств электроснабжения в лабораторных условиях и условиях эксплуатации.
2. Разработка математической модели объемной изоляционной структуры, учитывающей множественные внутренние и поверхностные дефекты.
3. Исследование характеристик ЧР на модели.
4. Создание и испытание опытного образца устройства контроля состояния электрической изоляции оборудования РУ-10 кВ тяговой подстанции.
5. Разработка технических условий на систему мониторинга технического состояния оборудования тяговой подстанции.

В качестве **объекта исследования** в настоящей работе выбраны изоляционные конструкции силового электрооборудования тяговых подстанций железных дорог. **Предметом исследования** является система контроля состояния электрической изоляции, работающая в режиме мониторинга.

**Методы исследования.** В ходе исследования применялись методы математического моделирования и экспериментальных исследований в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации.

В своей работе автор опирался на труды ученых: С. В. Ботова, Д. Вайды, В. П. Вдовико, О. В. Голенко, Г. Б. Дурандина, М. Г. Дурандина, С. В. Живодерникова, Ф. Р. Исмагилова, А. А. Косякова, Г. С. Кучинского, А. Г. Овсянникова, В. Н. Осотова, В. А. Русова, П. М. Сви, А. С. Серебрякова, А. П. Сухогужева, В. Т. Черемисина и др.

**Научная новизна работы** заключается в следующем.

1. Разработана математическая модель объемной изоляционной структуры с множеством дефектных областей.

2. Разработан алгоритм анализа изоляционной структуры и расчета характеристик ЧР при воздействии переменного напряжения промышленной частоты.

3. Получены зависимости характеристик ЧР от размера и количества дефектных областей.

4. Создана методика комплексной оценки состояния электрической изоляции оборудования тяговой подстанции под рабочим напряжением.

**Практическая значимость исследования.** Опытный образец устройства контроля состояния электрической изоляции оборудования РУ-10 кВ внедрен на тяговой подстанции Свердловской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Результаты диссертационного исследования использованы при разработке технических условий на систему мониторинга технического состояния оборудования тяговой подстанции для Департамента электрификации и электроснабжения ОАО «Российские железные дороги».

**Достоверность исследования.** Достоверность разработанной математической модели подтверждается результатами экспериментальных исследований характеристик ЧР в опорных изоляторах в лабораторных условиях. Обоснованность разработанного устройства непрерывного контроля электрической изоляции оборудования РУ-10 кВ подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований характеристик ЧР, а также положительным опытом его эксплуатации на тяговой подстанции Свердловской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

**На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментальных исследований характеристик ЧР в электрической изоляции устройств электроснабжения 6-10 кВ.

2. Математическая модель объемной структуры изоляции с множеством дефектов и методика расчета характеристик частичных разрядов.

3. Результаты теоретических исследований характеристик ЧР.

4. Устройство и результаты испытаний опытного образца аппаратуры контроля состояния электрической изоляции оборудования РУ-10 кВ.

5. Методика комплексной оценки состояния электрической изоляции силового оборудования переменного тока тяговой подстанции.

**Апробация работы.** Основные положения исследования доложены и обсуждены на IV Международной научной студенческой конференции «Trans-Mech-Art-Chem» (Москва, МИИТ, 2006); Всероссийской научной конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука – третье тысячелетие» (Красноярск, КРО НС «Интеграция», 2007); Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука – третье тысячелетие» (Красноярск, КРО НС «Интеграция», 2005); IV региональной научно-практической студенческой конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (Томск, ЭЛТИ ТПУ, 2004); V межвузовской научно-технической конференции «Молодые ученые – транспорту 2004» (Екатеринбург, УрГУПС, 2004); научно-технической конференции, посвященной 125-летию Свердловской железной дороги «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Екатеринбург, УрГУПС, 2003).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 12 научных статьях и двух свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ. Общий объем публикаций – 7,18 п.л., из которых автору принадлежит 4,43 п.л. Две статьи опубликованы в журнале, рекомендуемом ВАК для публикации научных результатов диссертации.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и семи приложений. Основное содержание изложено на 147 страницах машинописного текста, включает 22 таблицы и 79 рисунков. Библиографический список содержит 130 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности научной проблемы, формулирование цели и задач исследования, показана научная новизна и практическая значимость исследования, приведены положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации работы, описаны структура и объем работы, кратко раскрыто содержание разделов диссертации.

**В первой главе** диссертации приведена статистика отказов силового электрооборудования тяговых подстанций Свердловской железной дороги, подтверждающая высокий процент отказов из-за ухудшения диэлектрических свойств высоковольтной изоляции.

Выполнен анализ основных видов профилактических электрических испытаний (испытание повышенным напряжением, измерение сопротивления изоляции с определением коэффициента абсорбции, измерение тангенса угла диэлектрических потерь и других), применяемых в настоящее время для оценки состояния электрической изоляции устройств электроснабжения железных дорог. Установлено, что существующие методы контроля несовершенны и направлены в основном на определение степени увлажненности изоляции или выявление грубых дефектов. В качестве неэлектрических методов профилактического контроля рассмотрен хроматографический анализ масла. Отмечена высокая эффективность данного метода, однако область его применения ограничена маслonaполненным оборудованием.

Рассмотрены современные методы диагностики изоляционных конструкций под рабочим напряжением, такие как тепловизионный контроль, виброакустический метод и анализ характеристик ЧР. Среди перечисленных методов наибольшей эффективностью обладает метод, основанный на регистрации ЧР, поэтому данный

метод выбран в качестве основного при разработке системы мониторинга электрической изоляции.

Исследованию частичных разрядов и метода контроля на основе анализа их характеристик посвящены работы В. П. Вдовико, О. В. Голенко, Г. Б. Дурандина, С. В. Живодерникова, Г. С. Кучинского, А. Г. Овсянникова, В. Н. Осотова, В. А. Русова и других. Труды этих ученых направлены в основном на разработку аппаратуры контроля высоковольтной изоляции электроэнергетических систем. Применение рассматриваемого метода для устройств электроснабжения железных дорог требует дополнительных исследований с учетом особенностей работы оборудования.

Выполнен анализ и определены характеристики ЧР, имеющие наибольшую диагностическую ценность (кажущийся заряд, мощность разрядов). Установлено, что в отдельных случаях качество изоляции может быть выявлено по какой-либо одной наиболее показательной характеристике, например, по максимальному кажущемуся заряду, однако в большинстве случаев для объективной оценки должна быть исследована совокупность характеристик.

Рассмотрено современное измерительное оборудование, применяемое для регистрации импульсов ЧР (электронные осциллографы с функцией памяти, измерители на основе пиковых детекторов и высокочастотных компараторов, регистрирующее оборудование на основе высокочастотного АЦП). При создании опытного образца устройства контроля предложено использовать оборудование на основе пиковых детекторов и высокочастотных компараторов.

**Во второй главе** рассмотрены результаты экспериментальных исследований характеристик ЧР в электрической изоляции устройств электроснабжения 6-10 кВ. Основной целью практических исследований стало получение необходимого информационного материала и выбор диагностических критериев. В качестве объектов исследования были выбраны трансформаторы собственных нужд, измерительные трансформаторы напряжения и опорные изоляторы. Испытания проводились в ремонтно-ревизионном участке и Дорожной электротехнической лаборатории Свердловской железной дороги, филиале ОАО «РЖД». При измерении параметров ЧР в изоляции объектов исследования была использована типовая схема с включением измерительного элемента в ветвь соединительного конденсатора. В процессе эксперимента подаваемое напряжение постепенно увеличивалось от нуля до величины, равной испытательному напряжению. Для каждой ступени приложенного напряжения производилось измерение максимального кажущегося заряда.

В общей сложности обследованию подверглось более 20 устройств электроснабжения. Результаты экспериментальных исследований показывают, что с увеличением напряжения испытания уровень ЧР в изоляции оборудования также повышается. Для поврежденной или неисправной изоляции характерно резкое нарастание амплитуды разрядов и превышение ей величины 100 нКл. В тоже время исправная изоляция имеет значение максимального кажущегося заряда намного меньшей величины даже при установленном испытательном напряжении.

В качестве примера на рисунке 1 представлены совмещенные результаты обследования силовых трансформаторов ТМ-180/6 и ТМ-63/10, величины испытательных напряжений которых составляют 21,3 и 29,8 кВ соответственно. Из графиков видно, что с увеличением напряжения уровень ЧР также повышается. Для

трансформатора ТМ-63/10 амплитуда импульсов меняется незначительно и не превышает 10 нКл. У трансформатора ТМ-180/6 наблюдается резкое увеличение амплитуды разрядов. При испытательном напряжении значение максимального кажущегося заряда составляет 159 нКл, наблюдаются быстро развивающиеся поверхностные разряды и слышен шум. На основании этого было сделано предположение, что при длительном воздействии такого напряжения произойдет развитие сквозного пробоя, поэтому испытания трансформатора были прекращены, а качество его изоляции – признано недостаточным. Последующие испытания повышенным напряжением подтвердили это предположение.

Для изучения влияния внешних факторов на параметры ЧР в высоковольтной лаборатории УрГУПС был проведен ряд дополнительных экспериментальных исследований. Анализ опытных данных показал, что на характеристики ЧР оказывает влияние относительная влажность воздуха. Содержащаяся в воздухе влага заполняет неоднородности поверхности, тем самым влияет на условия развития поверхностных дефектов и их проявление. Наименьшая амплитуда импульсов наблюдается при относительной влажности, соответствующей нормальным условиям.

**Третья глава** посвящена теоретическому обоснованию эффективности оценки состояния электрической изоляции по характеристикам ЧР. Несмотря на известную взаимосвязь частичных разрядов с состоянием электрической изоляции методы контроля, основанные на регистрации ЧР, еще не получили широкого распространения. Одной из причин считается слабая теоретическая обоснованность некоторых характеристик ЧР, а также их взаимосвязь с такими параметрами изоляционной структуры как размер и количество дефектных областей. Экспериментальное исследование подобных зависимостей не представляется возможным и предполагает изучение данных явлений только на модели.

Разработанные в настоящее время простейшие плоскостные модели изоляционной структуры учитывают незначительное количество включений и не позволяют оценить реальную картину развития ионизационных процессов. В диссертации предложены имитационные модели с объемным характером дефектов. При создании имитационных моделей изоляционной структуры были приняты допущения:

1) в построении эквивалентной электрической схемы замещения учитываются только емкостные свойства изоляционной области, активная проводимость не учитывается;

2) электрическое поле внутри однородной изоляционной структуры равномерно;

3) при разряде в дефектной полости напряжение на ней снижается до нуля.

На рисунке 2 представлена модель изоляционной структуры, содержащая одну дефектную область. Включение является имитацией крупного поверхностного

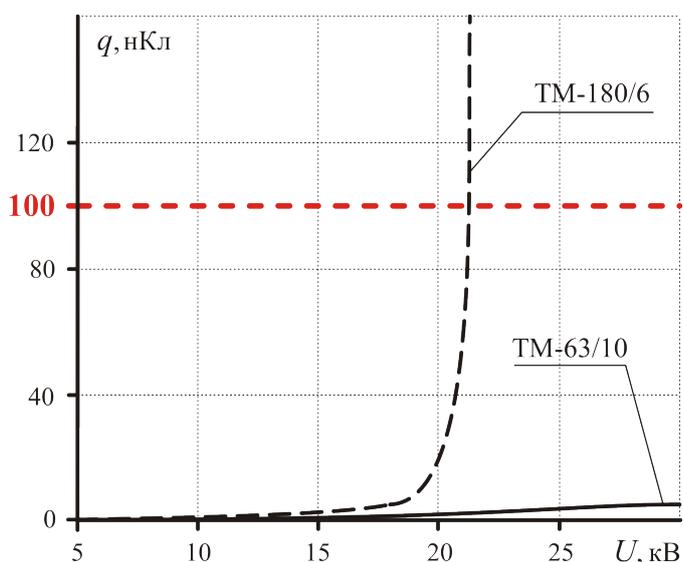
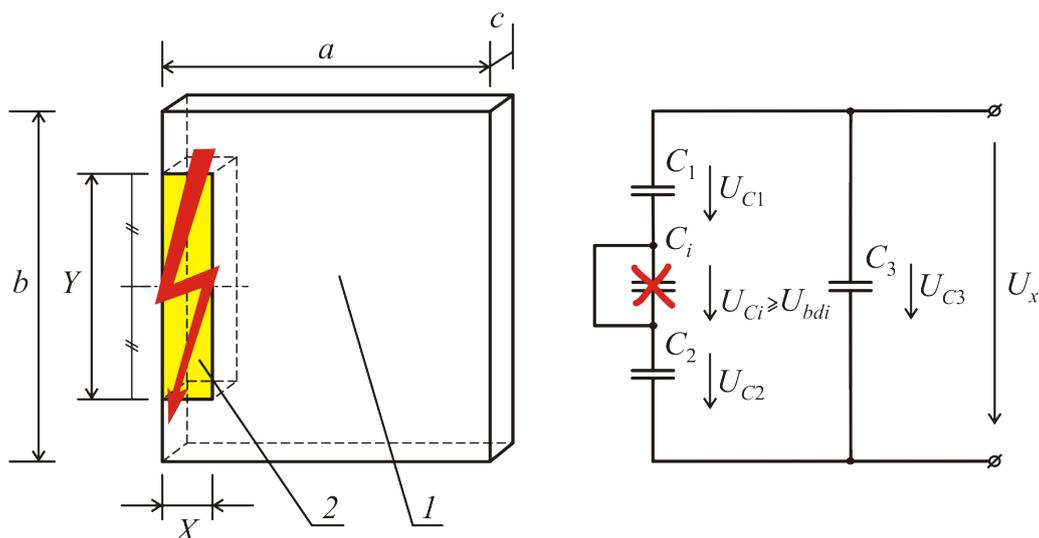


Рисунок 1 – Зависимость максимального кажущегося заряда ЧР от напряжения испытания



$a, b, c$  – геометрические размеры изоляционной конструкции,  
 $X, Y$  – геометрические размеры дефектной области;  $1$  – нормальная изоляция,  $2$  – включение  
 Рисунок 2 – Исследуемая изоляционная структура и ее эквивалентная схема замещения

дефекта и может располагаться как в центре боковой поверхности, так и быть смещенным произвольно по координате  $b$ . Размеры дефекта определяются переменными параметрами  $X$  и  $Y$ , третий размер принят равным толщине  $c$ . В процессе моделирования напряжение ступенчато подается на исследуемую систему, распределяется на емкостях электрической схемы замещения и становится равным  $U_{C1}$ ,  $U_{Ci}$ ,  $U_{C2}$  и  $U_{C3}$ . Если подаваемое напряжение достигает определенной величины  $U_x$ , а напряжение на емкости  $C_i$  превышает напряжение пробоя дефектной области  $U_{bdi}$ , то емкость  $C_i$  шунтируется. Исключение емкости  $C_i$  из схемы замещения сопровождается частичным разрядом. Для расчета кажущегося заряда ЧР предлагается использовать соотношение (1), при этом предполагается, что заряд на электродах объекта постоянен, а изменение напряжения на обкладках объекта связано с увеличением его емкости от значения  $C_0$  до значения  $C_x$ .

$$q = \Delta U C_0 = U_x C_0 \left( \frac{C_x - C_0}{C_x} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta U$  – изменение напряжения на объекте вследствие частичного разряда;  
 $U_x$  – приложенное к объекту напряжение, под действием которого происходит ЧР;  
 $C_0$  – начальная емкость исследуемого объекта;  
 $C_x$  – емкость объекта в момент ЧР.

Достоверность разработанной модели подтверждается результатами экспериментальных исследований характеристик ЧР в опорных изоляторах в лабораторных условиях: максимальное расхождение расчетных и экспериментальных значений кажущегося заряда поверхностных разрядов составляет 19 %.

На основании предложенной математической модели была создана программа для ЭВМ, имеющая свидетельство о государственной регистрации № 2009615918 от 26.10.09. Программа позволяет задавать различные размеры изоляционной структуры и самой дефектной области, устанавливать различные диэлектрические параметры материала изоляции и включения.

Для изучения влияния размеров дефектной области и параметров изоляционной среды на величину разряда с помощью разработанной программы был проведен ряд исследований. В качестве объекта исследований была выбрана область изоляционной конструкции, параметры которой были приняты в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Параметры моделируемого объекта

Размеры моделируемой области			Параметры электроизоляционного материала	
$a$ , мм	$b$ , мм	$c$ , мкм	Электрическая прочность, МВ/м	Диэлектрическая проницаемость
300	200	100	20	6

В результате проведенных исследований подтверждено, что из двух размеров дефекта вертикальный размер в наибольшей степени оказывает влияние на амплитуду импульса (рисунок 3). Проведенные исследования на модели с одним включением также показывают, что увеличение диэлектрической проницаемости материала изоляции приводит к снижению напряжения зажигания разряда и увеличению значения кажущегося заряда.

Основные принципы расчета, использованные при создании вышеописанной модели, легли в основу разработки более сложной имитационной модели, учитывающей множественные внутренние дефекты и выполняющей анализ изоляционной структуры под действием переменного напряжения. На основании математической модели автором создана программа для ЭВМ, имеющая свидетельство о государственной регистрации № 2010611500 от 19.02.2010. Моделируемая область представляет собой срез или сечение изоляционной конструкции и имеет объемную структуру. Принимается допущение, что содержащиеся в изоляционном слое дефекты имеют прямоугольную форму, определяющуюся индивидуальными для каждого включения размерами  $X$  и  $Y$ . Третий размер включений равен толщине исследуемого слоя. Исходными данными для моделирования служат минимальный и максимальный размер дефектных областей, количество включений, а также амплитуда приложенного напряжения. Геометрические и диэлектрические параметры изоляционной структуры также могут быть изменены.

В процессе формирования структуры изоляции происходит розыгрыш размеров включений. Величины  $X$  и  $Y$  являются случайными, в большинстве случаев не равны друг другу и могут иметь значения в соответствии с заданными пределами. Далее выполняется расстановка включений или розыгрыш их координат, при этом вероятность

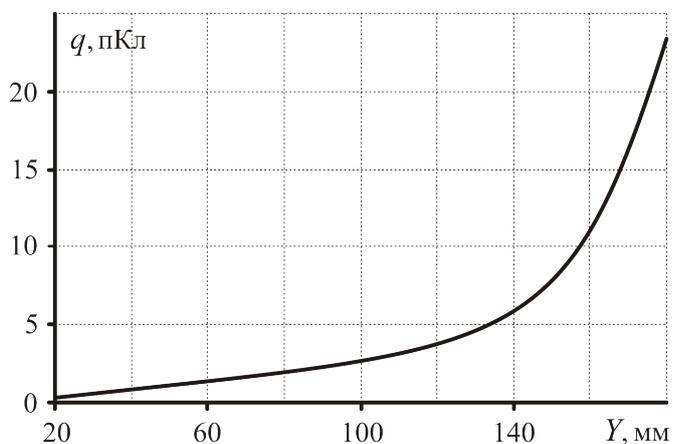


Рисунок 3 – Зависимость кажущегося заряда ЧР от вертикального размера дефекта

нахождения дефекта в каждой точке исследуемой структуры одинакова.

Расчет моделируемой структуры изоляции выполняется для одного периода приложенного напряжения. Имитация воздействия переменного напряжения осуществляется путем замены заданной функции напряжения ступенчатой фигурой. Для этого расчетный период разбивается на 48 временных зон, равных 7,5 эл. град. каждая. Расчет значения напряжения, приложенного к объекту, происходит в начале зоны. В дальнейшем в пределах зоны величина напряжения остается неизменной.

После расчета напряжения для рассматриваемой временной зоны выполняется анализ изоляционной структуры. В основу анализа исследуемого слоя и преобразования его к электрической схеме замещения положена методика сечения на элементарные зоны. Плоскость сечения *aStep* движется слева направо, последовательно разбивая структуру на зоны двух типов (рисунок 4). Зоны I типа имеют однородную диэлектрическую структуру и анализируются только на превышение электрической прочности. Зоны II типа содержат одну или несколько дефектных областей; при анализе зон данного типа выполняется расчет напряжений на элементах схемы замещения. Если напряжение на включении превышает максимально допустимое значение, происходит пробой данной области, что эквивалентно частичному разряду. При этом величина кажущегося заряда вычисляется в соответствии с (1).

После анализа всей структуры происходит переход к следующей временной зоне расчетного периода и исследование слоя повторяется. Когда анализ всех 48 временных зон закончен, производится оценка максимального кажущегося заряда за рассматриваемый период и расчет мощности частичных разрядов:

$$P = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{48} q_{TZone_i} U_{xi} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{48} (q_{i1} + q_{i2} + \dots + q_{in}) U_{xi}, \quad (2)$$

где  $q_{TZone_i}$  – сумма отдельных значений кажущихся зарядов ЧР за временную зону с номером  $i$ ;

$T=20$  мс – расчетный период времени.

Исследования, проведенные на разработанной модели, были направлены, в ос-

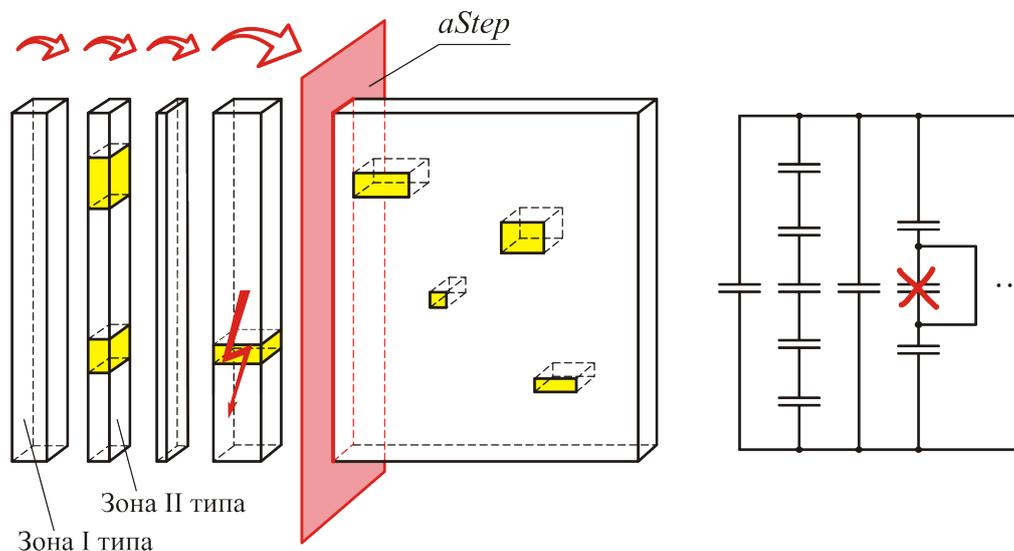


Рисунок 4 – Сечение изоляционного слоя с множеством дефектов на элементарные зоны и формирование электрической схемы замещения

новном, на изучение взаимосвязи между размерами скрытых внутренних дефектов, а также их количеством и характеристиками ЧР. Параметры объекта исследования соответствовали таблице 1, что обуславливало значение его емкости порядка  $10^{-15}$  Ф.

Первое исследование заключалось в изменении размеров дефектных областей и оценке максимального кажущегося заряда при одном и том же уровне напряжения (рисунок 5). Количество включений оставалось неизменным и составляло 70 шт. В качестве исходных условий горизонтальный и вертикальный размеры были приняты равными друг другу  $X=Y=h$  и принимали значения от 10 до 100 мкм. Действующее значение напряжения составляло 30 кВ. Результаты компьютерного моделирования показали, что увеличение размеров скрытых дефектов приводит к резкому и непропорциональному росту амплитуды импульсов.

Второе исследование было связано с оценкой влияния размеров включений на развитие ионизационного процесса. Для этого был произведен расчет трех изоляционных слоев, содержащих 70 включений, при различном уровне напряжения. Первый слой содержал дефектные области размером от 10 до 30 мкм, второй – от 30 до 70 мкм, а третий – от 70 до 100 мкм. Результаты представлены на рисунках 6 и 7. Анализ полученных данных показывает, что с увеличением напряжения амплитуда максимального кажущегося заряда и мощность импульсов растет. При этом изоляционная структура, имеющая дефекты большего размера, всегда будет иметь импульсы ЧР большей амплитуды и мощности. На рисунке 6 увеличение кажущегося заряда происходит по линейному закону. В тоже время результаты практических исследований подтвердили преимущественно экспоненциальный характер кулон-вольтной характеристики. В действительности, процесс горения ЧР приводит к разрушению дефектных областей изнутри, вследствие чего размер включений увеличивается. Разработанная модель предполагает постоянный размер включений, чем объясняется линейность полученной зависимости.

Исследования, связанные с изменением количества дефектов, проводились для изоляционных структур, содержащих 30, 70 и 130 включений. С ростом числа дефектов увеличиваются частота и мощность импульсов, что может привести к разогреву изоляции и снижению ее диэлектрических свойств.

Результаты исследования на модели показывают, что увеличение размера дефектных областей приводит к возрастанию амплитуды ЧР. Изменение числа дефектов на амплитуде разрядов не отражается, однако влияет на величину мощности импульсов. Таким образом, постоянный контроль кажущегося разряда и мощности ЧР позволяет производить оценку текущего состояния высоковольтной изоляции и дает возможность предупредить развитие дефектов в ней до критических значений.

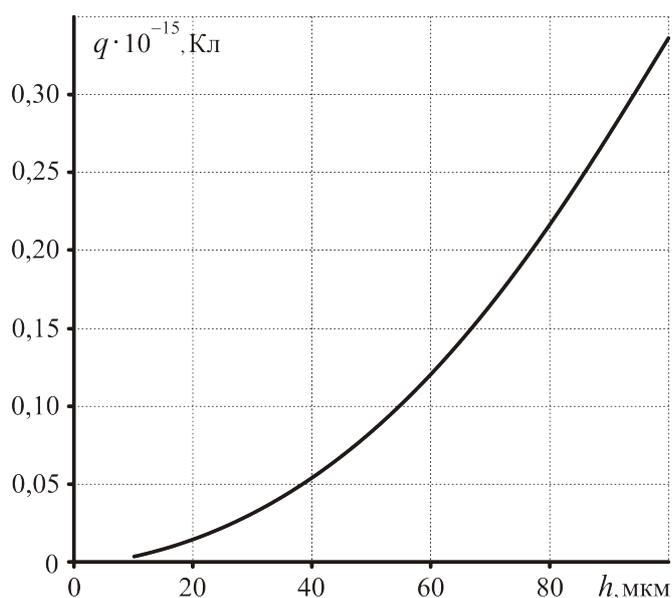


Рисунок 5 – Зависимость максимального кажущегося заряда ЧР от размера включений

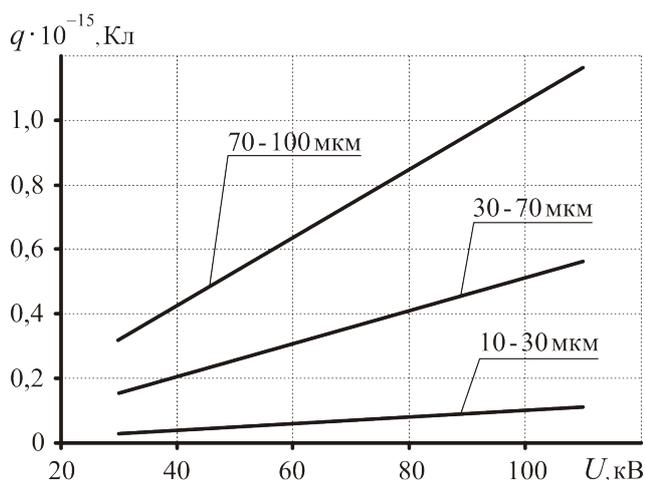


Рисунок 6 – Графики зависимости максимального кажущегося заряда ЧР от напряжения

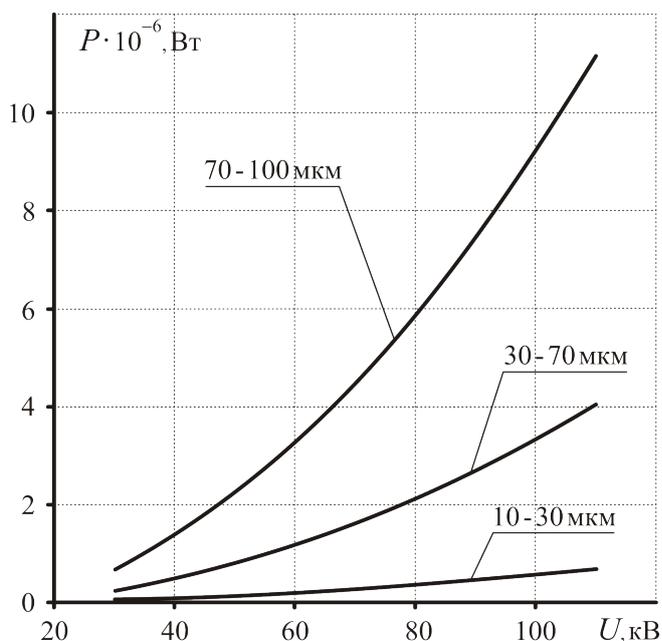


Рисунок 7 – Графики зависимости мощности ЧР от напряжения

**Четвертая глава** посвящена разработке опытного образца устройства контроля состояния электрической изоляции оборудования тяговых подстанций. По заданию Свердловской железной дороги в соответствии с договором НИОКР НЮ-524/08 от была создана и запущена в тестовую эксплуатацию система мониторинга изоляции шин РУ-10 кВ одной из тяговых подстанций. После анализа представленных на рынке моделей измерительного оборудования было принято решение о построении опытного образца на базе измерителя частичных разрядов R-400 разработки и производства ООО ПФФ «Вибро-Центр» (с 2010 г. – ООО «Димрус»). Принцип действия прибора основан на измерении импульсов посредством пиковых детекторов и высокочастотных компараторов. Измеритель позволяет регистрировать такие характеристики ЧР как амплитуда  $Q_{02}$  (кажущийся заряд, повторяющийся не менее 10 раз за секунду) и интенсивность импульсов  $PDI$  (интегральная характеристика, пропорциональная мощности ЧР). В приборе реализовано несколько алгоритмов отстройки от помех и два типа разбраковки зарегистрированного сигнала (разбраковка по амплитуде и по времени прибытия импульса), что особенно важно в условиях реальной тяговой подстанции и позволяет исключить из результатов измерений большую часть наведенных сигналов.

Опытный образец устройства контроля был смонтирован в резервной ячейке КРУ. Высоковольтный блок устройства состоит из высоковольтных соединительных конденсаторов, соединенных по схеме «звезда» и подключается к шинам через разъединитель (рисунок 8). Соединительные конденсаторы служат для отделения высоковольтной цепи от измерительной, конденсатор каждой фазы имеет емкость порядка 94 пФ. В заземляющие проводники конденсаторов включены датчики ЧР типа RFCT-5 (высокочастотные трансформаторы тока). Сигналы с датчиков по коаксиальному кабелю передаются на измеритель R-400. Система контроля имеет блок синхронизации AR-1, позволяющий «привязывать» зарегистрированные импульсы к синусоиде питающего напряжения.

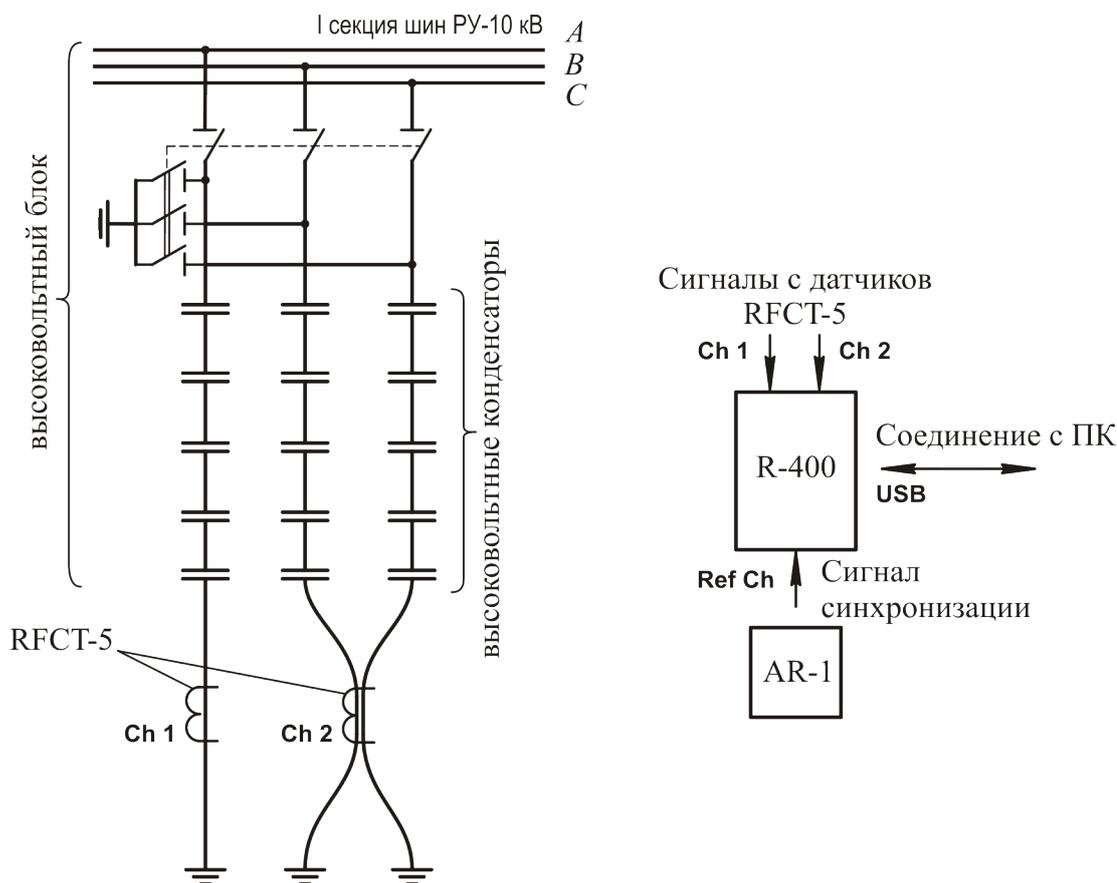


Рисунок 8 – Принципиальная схема подключения опытного образца к системе шин РУ-10 кВ

При включении устройства в работу обеспечивается контроль защитной зоны, которая состоит из I секции шин РУ-10 кВ и следующих присоединений: питающий ввод и обмотка 10 кВ головного трансформатора ТДТН-25000/110, обмотка высокого напряжения трансформатора собственных нужд ТМ-400/10, фидер нетяговых потребителей и обмотка трансформатора напряжения НТМИ-10.

Калибровка устройства была выполнена в соответствии с рекомендациями действующих стандартов. В результате калибровки были получены коэффициенты чувствительности 34,88, 24,59 и 30 нКл/В для фаз А, В и С соответственно. При этом емкость каждой фазы относительно земли составляла 6...8 нФ.

Для проверки системы мониторинга было выполнено сравнение результатов измерения импульсов ЧР прибором R-400 и электронным осциллографом. Матрица ЧР (рисунок 9) показывает, что наибольшей частотой следования обладают импульсы амплитудой 600...800 мВ. В тоже время из осциллограммы видно (рисунок 10), что амплитуда зарегистрированного импульса составляет 800 мВ.

В процессе наладки опытного образца были поставлены эксперименты, в ходе которых уточнялись наиболее информативные места расположения измерительных датчиков и был произведен выбор наиболее эффективного способа отстройки от помех. С учетом особенностей прибора оптимальным вариантом является схема по рисунку 8. Измерение импульсов производится датчиком, установленным в фазу А. Две другие фазы объединены, сумма сигналов импульсов ЧР фаз В и С от второго датчика поступает на шумовой канал прибора. В этом случае использование разбровки по амплитуде дает наибольший эффект.

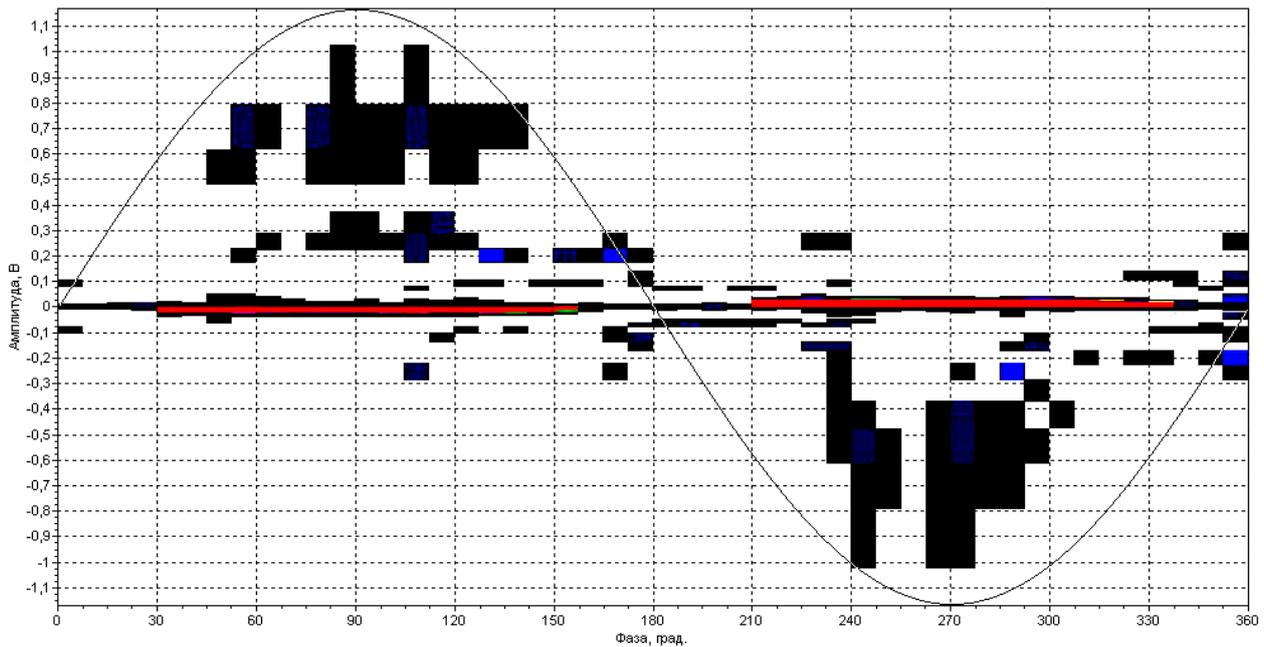


Рисунок 9 – Результаты измерения ЧР системой мониторинга

Опытная эксплуатация устройства показывает высокую эффективность диагностики состояния электрической изоляции оборудования тяговых подстанций. В качестве примера на рисунке 11 представлен график изменения амплитуды ЧР в контролируемом объекте в период с 18.04. по 20.04.2009. Измерения выполнялись в автоматическом режиме каждые 30 мин. В рассматриваемый период максимальное значение амплитуды импульсов составляет 20 нКл, что меньше критического значения – 100 нКл. Поэтому общее состояние электрической изоляции было признано удовлетворительным.

Известно, что изменение уровня ЧР в контролируемом оборудовании может быть связано не только с процессами старения электрической изоляции. Для изучения влияния внешних факторов на амплитуду импульсов результаты мониторинга были сопоставлены с данными метеорологической службы, а также с изменением величины электрической нагрузки. На рисунках 12 и 13 представлены графики изменения температуры и относительной влажности воздуха в течение рассматриваемого периода времени.

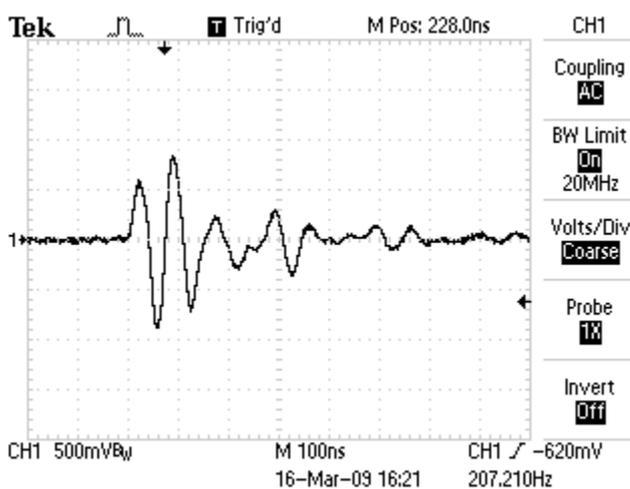


Рисунок 10 – Осциллограмма импульса ЧР в контролируемом объекте

В результате сравнения изменения амплитуды ЧР и параметров окружающей среды установлено, что наибольшая корреляция наблюдается между амплитудой ЧР и относительной влажностью воздуха (коэффициент корреляции от -0,71 до -0,78). Влияние абсолютной влажности и температуры воздуха проявляется меньше (коэффициент корреляции -0,59 и 0,63 соответственно). Взаимосвязь между характеристиками ЧР и величиной электрической нагрузки оборудования не выявлена.

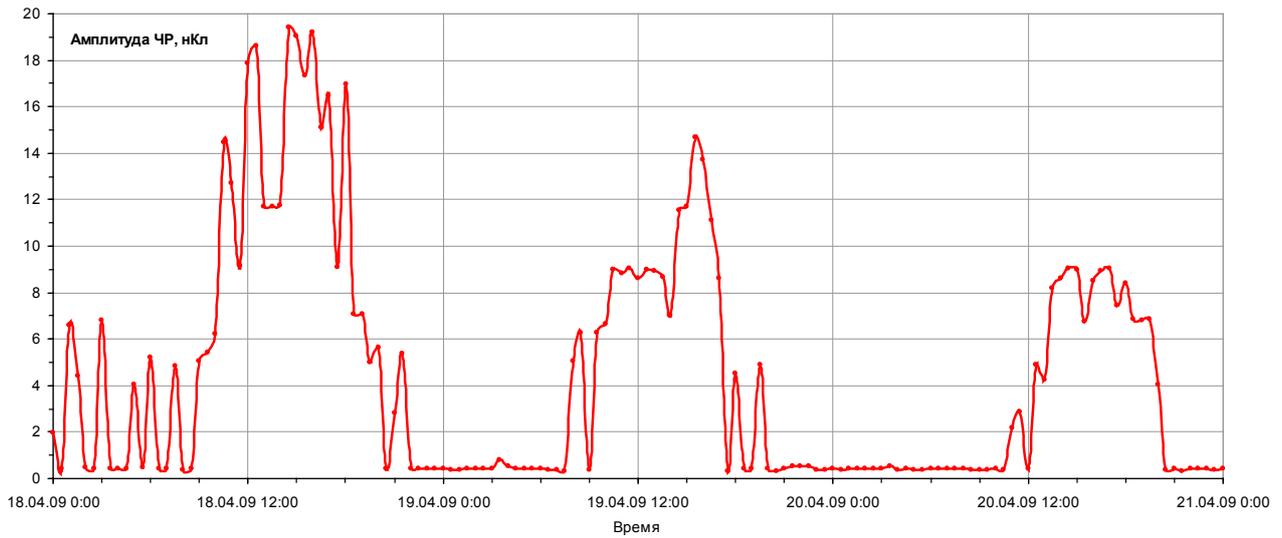


Рисунок 11 – Изменение амплитуды частичных разрядов в контролируемом объекте в период с 18.04. по 20.04.2009

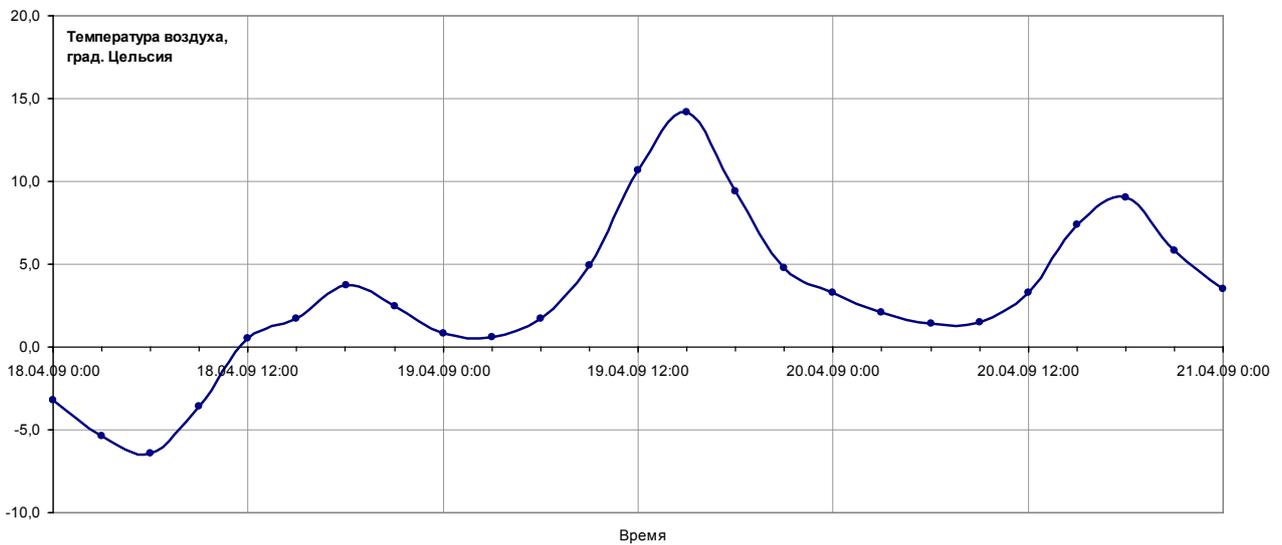


Рисунок 12 – График изменения температуры воздуха в рассматриваемый период

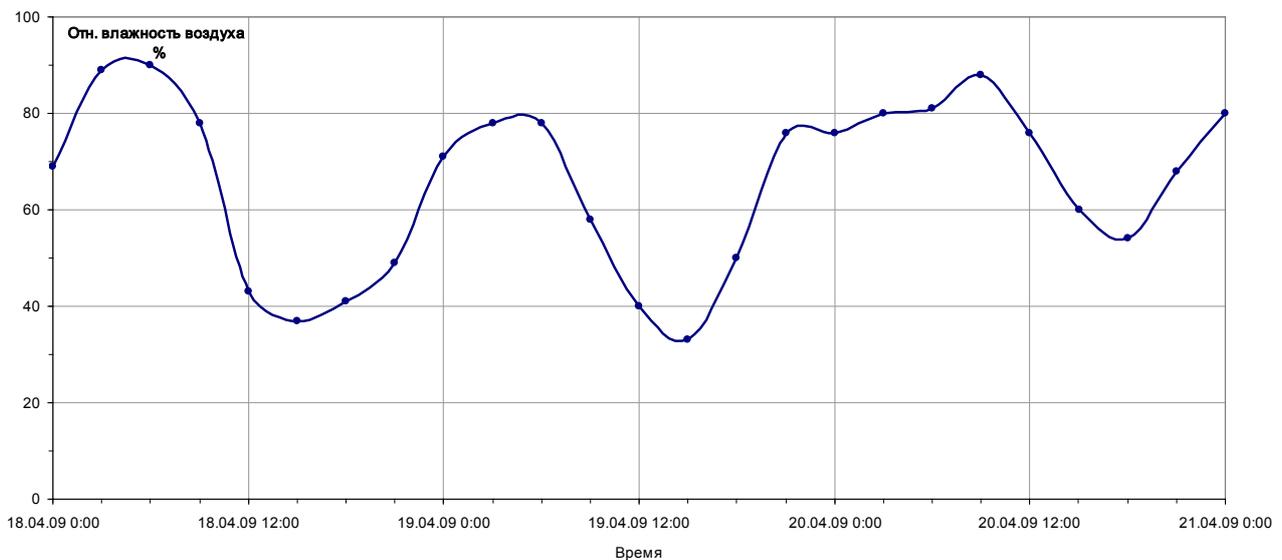


Рисунок 13 – График изменения относительной влажности воздуха в рассматриваемый период

Анализ результатов мониторинга и воздействия внешних факторов показывает, что для данного оборудования наибольшей амплитудой обладают поверхностные разряды. Внутренние разряды на момент испытаний минимальны и не представляют опасности для оборудования.

Выполнен расчет экономической эффективности от внедрения опытного образца устройства контроля состояния электрической изоляции оборудования РУ-10 кВ тяговой подстанции, годовой экономический эффект от внедрения устройства составляет не менее 230 тыс. руб.

**Пятая глава.** Разработана структура комплексной системы диагностического мониторинга оборудования тяговой подстанции. Система предназначена для осуществления непрерывного контроля состояния электрической изоляции наиболее значимого и дорогостоящего высоковольтного оборудования: силовых маслонаполненных трансформаторов, масляных или элегазовых выключателей, распределительных устройств, кабельных и воздушных линий.

В качестве основного метода диагностики предлагается использовать анализ характеристик частичных разрядов. Дополнительным методом контроля является анализ токов проводимости высоковольтных вводов. Для более полной оценки технического состояния оборудования может быть реализован контроль остаточного коммутационного ресурса – для выключателей, контроль работы системы охлаждения и анализ растворенных в масле газов – для силовых трансформаторов.

В качестве аппаратуры контроля оборудования 110 (220) кВ предлагается использовать измерители частичных разрядов R-2100 или комплексные диагностические приборы марок TIM-3, TIM-9 и TDM российского производства. Контроль

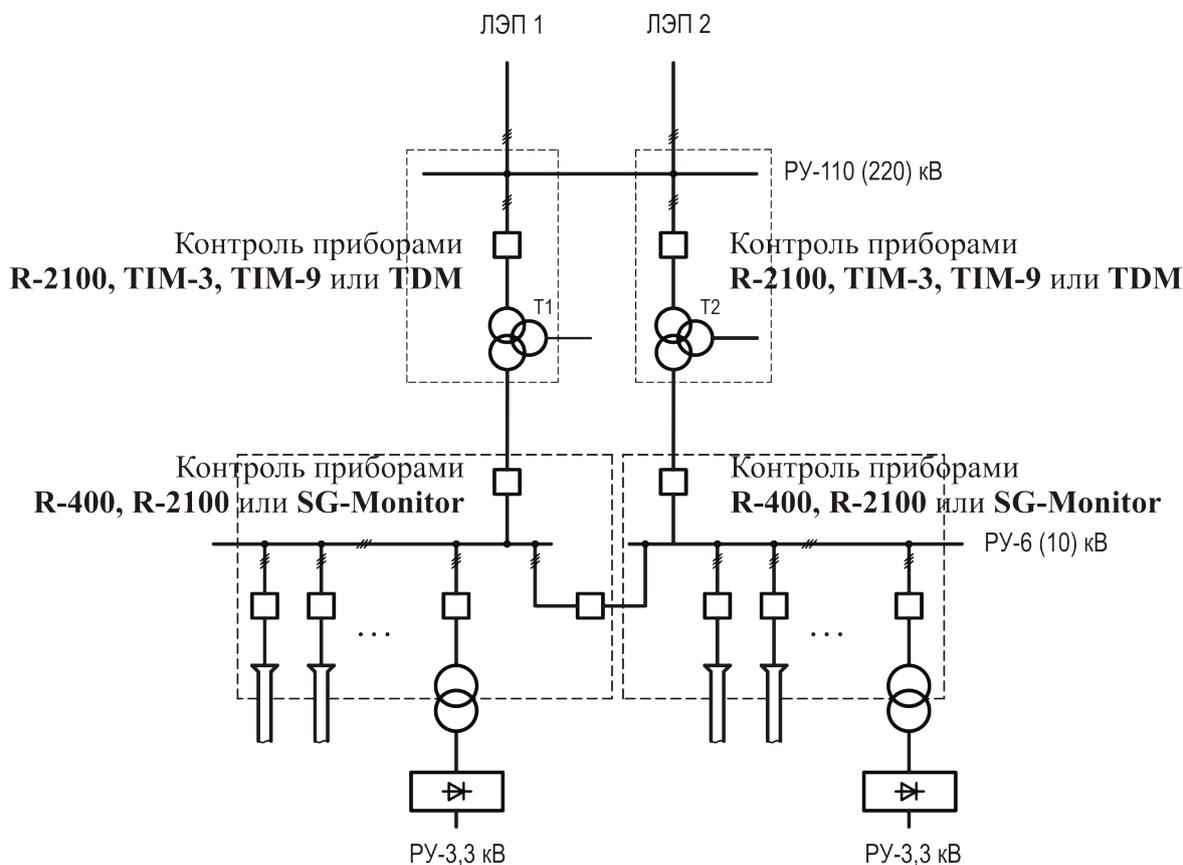


Рисунок 14 – Упрощенная схема контролируемой тяговой подстанции

оборудования 6 (10) кВ может осуществляться измерителями R-400, R-2100 или приборами марки SG-Monitor. Для контроля состояния трансформаторного масла предлагается использовать приборы производства различных иностранных фирм.

После монтажа системы диагностическое оборудование объединяется в единую систему. Вся информация о техническом состоянии контролируемого оборудования тяговой подстанции может быть передана по каналам связи в АСУ более высокого уровня.

Применение такого диагностического решения является эффективным способом предупреждения аварийных ситуаций и позволяет решить вопрос о возможности продления фактического ресурса оборудования без риска наступления внезапного отказа. Наличие информации о текущем состоянии позволяет также произвести реорганизацию в системе обслуживания, выполнив переход от плановых периодических испытаний к контролю оборудования по его техническому состоянию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определен критический уровень частичных разрядов в электрической изоляции устройств электроснабжения железных дорог. Амплитуда импульсов ЧР, равная 100 нКл, соответствует предпробойному состоянию высоковольтной изоляции и способствует дальнейшему ухудшению ее диэлектрических свойств.

2. Разработана математическая модель объемной изоляционной структуры, учитывающая множественные внутренние и поверхностные дефекты и позволяющая проводить оценку таких характеристик как кажущийся заряд и мощность ЧР при воздействии переменного напряжения на исследуемую область. Проведено сравнение результатов моделирования поверхностных дефектов с натурными экспериментами в лабораторных условиях, подтверждена достоверность разработанной модели. По результатам исследования на модели получены зависимости характеристик ЧР от размера и количества дефектных областей, подтверждающие взаимосвязь амплитуды и мощности импульсов с состоянием электрической изоляции.

3. Разработан и внедрен опытный образец устройства непрерывного контроля состояния электрической изоляции оборудования РУ-10 кВ тяговой подстанции. Осуществлен выбор оптимальных мест расположения измерительных датчиков и подтверждена эффективность отстройки от помех методом разброски по амплитуде. Опытная эксплуатация системы мониторинга показала ее высокую эффективность. Установлены основные зависимости характеристик ЧР в оборудовании РУ-10 кВ от параметров окружающей среды. Наибольшая корреляция наблюдается между амплитудой импульсов и относительной влажностью воздуха (коэффициент корреляции от -0,71 до -0,78). Влияние абсолютной влажности воздуха и температуры проявляется меньше (коэффициенты корреляции -0,59 и 0,63 соответственно). Взаимосвязь между характеристиками ЧР и величиной электрической нагрузки оборудования не выявлена.

4. Предложена методика комплексной оценки состояния высоковольтной изоляции оборудования тяговой подстанции по характеристикам ЧР: произведе-

ден анализ и выбор оптимальных измерительных схем и мест расположения измерительных датчиков для силовых трансформаторов, масляных выключателей и оборудования распределительного устройства среднего напряжения. Предложена аппаратура контроля. На основании проведенных теоретических исследований выполнена разработка технических условий на систему мониторинга технического состояния тяговой подстанции ТУ 3185-007-77147848 для Департамента электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД».

5. Выполнен расчет экономической эффективности от внедрения опытного образца устройства контроля состояния электрической изоляции оборудования РУ-10 кВ тяговой подстанции, годовой экономический эффект от внедрения устройства составляет не менее 230 тыс. руб.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Бунзя А.А. Разработка трехмерной имитационной модели высоковольтной изоляции с множеством дефектов [Текст] / А.А. Бунзя // Транспорт Урала. – 2009. – №4 (23). – С. 89–92. **Входит в Перечень изданий рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертации.**

2. Бунзя А.А. Основные результаты испытаний опытного образца устройства контроля состояния электрической изоляции оборудования тяговых подстанций [Текст] / А.П. Сухогузов, А.П. Пятецкий, Александр А. Бунзя, Анна А. Бунзя, А.А. Макаров // Транспорт Урала. – 2009. – №3 (22). – С. 94–99. **Входит в Перечень изданий рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертации.**

3. Бунзя А.А. Расчет трехмерной модели высоковольтной изоляции с множеством дефектов / А.А. Бунзя, А.П. Сухогузов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611500 Рос. Федерации от 19.02.2010.

4. Бунзя А.А. Моделирование ионизационных процессов в электрической изоляции / А.А. Бунзя, А.П. Сухогузов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009615918 Рос. Федерации от 26.10.2009.

5. Бунзя А.А. Моделирование ионизационных процессов в электрической изоляции: разработка трехмерной имитационной модели с одним включением [Текст] / А.А. Бунзя // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – Екатеринбург : УрГУПС, 2009. – №1. – С. 90–97.

6. Bunzya A. Methods of Diagnostics of High-voltage Insulation on Railway Traction Substations [Текст] / А.А. Бунзя // «Trans-Mech-Art-Chem» // Труды IV Международн. научн. студ. конф. – М. : МИИТ, 2006. – С. 22–23.

7. Бунзя А.А. Моделирование ионизационных процессов в электрической изоляции устройств электроснабжения железных дорог [Текст] / А.А. Бунзя, А.П. Сухогузов // Молодежь и наука – третье тысячелетие : Сб. материалов Всероссийск. научн. конф. студ., аспирант. и молодых уч. / Сост.: Сувейзда В.В.; КРО НС «Интеграция», – Красноярск, 2007. – С. 461–465.

8. Бунзя А.А. Определение состояния электрической изоляции маломощных высоковольтных трансформаторов по скорости нарастания амплитуды частичных разрядов [Текст] / А.А. Бунзя // Молодые ученые – транспорту : Труды VI межвуз. научно-техн. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2005. – С. 32–39.

9. Бунзя А.А. Совершенствование системы диагностики изоляции устройств электроснабжения железных дорог [Текст] / А.П. Сухогузов, И.А. Пятецкий, А.А. Косяков, А.А. Бунзя // Транспорт Урала. – 2004. – №3 (3). – С. 44–51.

10. Бунзя А.А. Разработка метода неразрушающего контроля изоляции трансформаторов собственных нужд по амплитудным характеристикам частичных разрядов [Текст] / А.А. Бунзя, А.П. Сухогузов // Молодежь и наука – третье тысячелетие : Сб. материалов Всероссийск. научн. конф. студ., аспирант. и молодых уч. / Сост.: Сувейзда В.В.; КРО НС «Интеграция», – Красноярск, 2005. – С. 348–351.

11. Бунзя А.А. Диагностика изоляции устройств электроснабжения железных дорог по характеристикам частичных разрядов при плановых периодических высоковольтных испытаниях [Текст] / А.А. Косяков, А.А. Бунзя // Молодые ученые – транспорту : Труды V межвуз. научн.-техн. конф. – Екатеринбург : УрГУПС. В 2-х ч. – Ч. 2. – 2005. – С. 37–43.

12. Бунзя А.А. Характеристики частичных разрядов в трансформаторах напряжения 6–10 кВ [Текст] / А.А. Бунзя // Электротехника, электромеханика и электротехнологии : Сб. научн. трудов IV регион. научно-практич. студ. конф. – Томск : ЭЛТИ ТПУ. – 2004. – С. 221–224.

13. Бунзя А.А. Влияние влажности воздуха на амплитудные характеристики частичных разрядов в изоляции трансформаторов напряжения [Текст] / А.П. Сухогузов, А.А. Косяков, А.А. Бунзя // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : материалы научн.-техн. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – Том 1. – С. 276–287.

14. Бунзя А.А. Влияние влажности воздуха на напряжение зажигания частичных разрядов в изоляции устройств 6-10 кВ [Текст] / А.П. Сухогузов, А.А. Косяков, А.А. Бунзя // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : материалы научн.-техн. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – Том 1. – С. 271–276.



БУНЗЯ Александр Андреевич

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ  
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ  
УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66  
Издательство УрГУПС

Бумага офсетная  
Тираж 100 экз.

Подписано к печати 13.01.2011  
Формат бумаги 60×84/16

Усл. печ. л. 1,3  
Заказ 3