

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЧАН КИ ФУК

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ
ПО ПАРАМЕТРАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ
(теория и разработка)

05.11.13 - приборы и методы контроля и защиты окружающей
среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Харьков 1996



Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре "Приборы и методы неразрушающего контроля" Харьковского государственного политехнического университета.

Научный консультант - доктор технических наук, профессор Себко
Вадим Пантелеевич.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Бабак
Виталий Павлович,

- доктор технических наук, профессор Кузьмин
Виктор Владимирович,

- доктор технических наук, профессор Артюх
Станислав Федорович.

Зедущая организация - Харьковский физико-технический институт
НАН Украины, г. Харьков.

ащита состоится 29 февраля 1996 г. в _____ час. на заседании
специализированного совета Д 02.09.11 в Харьковском государственном
политехническом университете (310002, Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского
государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "27" января 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета



Горкунов Б.М.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из главных направлений развития народного хозяйства является ускоренное создание и освоение надежного электрооборудования для генерирования, передачи и распределения электрической энергии и линий электропередачи. Особое значение при производстве и эксплуатации таких оборудований приобретает дальнейшее совершенствование и разработка методов, средств контроля и диагностики состояния их электрической изоляции, поскольку именно последнее в основном определяет надежность всего электрооборудования.

В настоящее время широкое развитие получают методы и устройства неразрушающего контроля диэлектрических материалов и изделий, основанные на различных физических эффектах: акустические, оптические, тепловые, радиационные, радиоволновые, электрические и др. Среди них особое значение имеет электрический метод контроля, основанный на анализе параметров частичных разрядов (ЧР), возникающих в газовых дефектах объекта. Это обусловлено рядом причин.

Во-первых, было установлено, что одной из основных причин ухудшения свойств твердого диэлектрика в условиях эксплуатации является действие частичных разрядов в газовых дефектах внутри диэлектрика или в местах контакта его с токоведущими частями установок. Во-вторых, при современном уровне технологии производства изоляции невозможно абсолютно исключить газовые дефекты и обеспечить идеальный контакт между диэлектриком и металлическими частями в электрооборудованиях. Более того, в процессе эксплуатации, под воздействием электрических и тепловых полей, механических нагрузок, а в ряде случаев и увлажнения, в первоначально высококачественной изоляции все равно будут

ЛИБ М. В. Стефан...
все равно будут

зарождаться и прогрессировать газовые дефекты. В-третьих, вследствие разрушения под воздействием частичного разряда, электрофизические характеристики изоляции постепенно ухудшаются, что приводит к ее электрическому старению и последующему ее выходу из строя.

Следует отметить, что исследование характеристик ЧР стало вопросом первостепенной важности для электрических кабелей, конденсаторов, электрических машин, трансформаторов тока, проходных изоляторов, стеклопластиковых подвесных изоляторов, волоконно-оптических элементов электронно-оптических преобразователей, работающих при переменном, постоянном, пульсирующем и импульсном напряжениях.

Значительный вклад в развитие теории и практики контроля и диагностики диэлектрических материалов по параметрам ЧР внесли ученые Александров Н.В., Багиров М.А., Бондаренко П.Н., Вдовико В.П., Джуварлы Ч.М., Дмитриев А.В., Ильченко Н.С., Кириленко В.М., Койков С.Н., Кучинский Г.С., Набока Б.Г., Ренне В.Г., Сканави Г.И., Bartnikas R., Domansky K., Gulski E., Harrold R., Hikita M., Hirabayashi R., Holboll J.T., Iede M., Kreuger F.H., Lemke E., Mangiavacchi C., von Philippoff, Rabach G., Rueth W., Rygal R., Tanaka T., Whitehead S. и др.

К настоящему времени основное внимание было уделено методам обнаружения ЧР в конкретных конструкциях и изучению закономерностей электрического старения различных диэлектрических материалов под воздействием электрического поля и разрядов. Между тем всегда существует необходимость выявить размеры и конфигурацию дефектов, вызывающих ЧР, поскольку степень разрушения изоляции определяется не интегральными характеристиками ЧР, а локальными. Имея информацию о распределении дефектов по типам, размерам и

Т.д., можно с помощью математического и компьютерного моделирования прогнозировать срок службы конструкции.

Следует отметить, что решение обратной задачи — выделения сведений о геометрических и электрофизических параметрах дефекта из многопараметровой информации, содержащейся в сигналах ЧР, является в общем случае достаточно трудоемким и громоздким, поскольку при этом необходимо 1) учесть стохастическую природу газового разряда, механизмы и некоторые элементарные процессы которого к настоящему времени не достаточно изучены и 2) решить систему нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений, содержащих контролируемые параметры объекта. Это обстоятельство в существенной мере ограничивало развитие методов и устройств для определения электрофизических и геометрических параметров дефектов диэлектрических материалов и изделий.

К настоящему времени не была рассмотрена теоретическая основа методов контроля и диагностики на основе анализа ЧР, не были разработаны универсальные математические модели системы контроля и диагностики состояния электрической изоляции, на основе которых можно решить и прямую задачу (определить стохастическое распределение параметров прогрессирующих ЧР по известным размерам и конфигурации дефектов) и обратную задачу (по контролируемым параметрам прогрессирующих ЧР определить характерные размеры и конфигурацию дефектов). Отсутствовала методология построения программно-аппаратного обеспечения системы для контроля и диагностики состояния изоляции, основанной на универсальном и относительно дешевом персональном компьютере IBM PC AT. Не были разработаны методики расчета пространственно-временного распределения квазистатического электрического поля в системе "металлические электроды — твердые диэлектрики — газовые дефекты".

позволяющие расчетным путем определить параметры элементарных процессов газового разряда в малых промежутках, для измерения которых реальные эксперименты неэффективны, дорогостоящи или невозможны. Не исследована возможность таких новых методов теории распознавания образов в автоматической идентификации дефектов-источников ЧР, как методы нейрорподобных сетей, методы потенциальной функции. Не рассмотрены так же вопросы метрологии общей системы контроля и диагностики состояния электрической изоляции.

В связи с этим исследование и разработка методов и средств контроля и диагностики диэлектрических материалов и изделий по параметрам ЧР представляет собой актуальную научную проблему, имеющую важное для народного хозяйства значение.

Работа была начата на кафедре "Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника" Харьковского Государственного Политехнического Университета (ХГПУ), выполнена на основании хоздоговоров (№31555 и №31430), заключенных между ХГПУ (г.Харьков) с ВНИИЗИМ (г.Москва), и продолжена на кафедре "Приборы и методы неразрушающего контроля" ХГПУ в рамках Международного договора между Харьковским Государственным политехническим университетом и Ханойским технологическим университетом (№ В-6106).

Цель и задачи исследований. Целью данной работы является теоретическое обоснование и разработка методов, средств контроля и диагностики состояния диэлектрических материалов и изделий, основанных на анализе параметров ЧР. Достижение поставленной цели связано с необходимостью решения следующих задач:

-по известным размерам и конфигурациям дефектов определить на основе анализа физических процессов, развивающихся в дефектах изоляции, стохастические распределения параметров прогрессирующих

ЧР (прямая задача);

-по контролируемым параметрам прогрессирующих ЧР определить характерные размеры и конфигурации дефектов диэлектрических материалов и изделий (обратная задача);

-разработать математическую модель системы диагностики-объекта контроля, позволяющую охватывать широкий класс диэлектрических материалов и дефектов;

-создать методiku математического моделирования и компьютерной имитации процесса следования ЧР как способ решения прямой задачи;

-разработать методiku расчета пространственно-временного распределения электрического поля в системе "металлические электроды- твердые (жидкие) диэлектрики- газовые дефекты";

-создать на основе анализа распределения электрического поля в диэлектрике математическую модель газового дефекта, охватывающую все основные процессы в дефекте;

-разработать методики автоматической идентификации дефектов-источников ЧР;

-рассмотреть методологию построения аппаратно-программного обеспечения системы контроля и диагностики состояния электрической изоляции;

-исследовать метрологические вопросы, связанные с данной системой контроля и диагностики изоляции и рассмотреть особенности реализации разработанной теории на реальных высоковольтных конструкциях.

-внедрить результаты разработок в промышленность.

Методы исследования. Для решения комплекса вопросов, составляющих содержание поставленной проблемы, применен широкий диапазон современных методов теоретических и экспериментальных

исследований, в том числе: методы имитационного статистического моделирования при решении прямой задачи диагностики диэлектриков; методы регрессионного и факторного анализа при обработке данных ЧР; методы нейроразличной сети при идентификации источников ЧР; метод вторичных источников, метод разделения переменных и локально-одномерный численный метод при расчете электрического поля; метод регуляризации при анализе устойчивости решения краевых задач и при построении регрессионных моделей; объектно-ориентированный метод при разработке программного обеспечения.

Научная новизна. На основе введенных в диссертационной работе обобщенных параметров ЧР, методов, моделей и алгоритмов решена научная проблема теоретического обоснования и создания системы контроля и диагностики состояния диэлектрических материалов, изделий и конструкций при их изготовлении и эксплуатации.

Основные научные результаты выполненной работы заключаются в следующем:

- разработаны обобщенные модели чередования импульсов ЧР на волне испытательного синусоидального напряжения;
- получены соотношения между обобщенными параметрами ЧР и геометрическими характеристиками газовых дефектов;
- создана математическая модель развития ЧР, учитывающая их дискретность в пространстве;
- предложены методы определения параметров дефектов по данным о амплитуде импульсов ЧР и фазе их появления;
- разработаны методики расчета пространственно-временного распределения электрического поля в системе, содержащей тонкие заряженные слои на границах сред, в том числе в комплексе "металлические электроды- твердые (жидкие) диэлектрики- газовые

дефекты";

-получены аналитические решения указанной задачи расчета электрического поля для сферической и цилиндрической формы дефекта

-разработаны численные алгоритмы расчета поля для осесимметричных дефектов и для общего случая и получены критерия устойчивости решения;

-получены уравнения для определения скорости обучения многослойного персептрона;

-разработаны методы кодирования информации о ЧР для организации нейроподобной сети с ансамблевой и многослойной структурой;

-предложены методики разложения суммарного амплитудно-фазового распределения импульсов ЧР на единичные;

-разработаны методики расчета погрешностей измерений параметров ЧР и дефекта.

Практическая ценность работы.

Наиболее существенными прикладными результатами работы являются:

-разработана информационно-измерительная система для контроля и диагностики состояния изоляции на базе персонального компьютера IBM PC AT;

-создан комплекс программ и подпрограмм для реализации существующих и модифицированных алгоритмов обучения нейроподобных сетей и распознавания дефектов-источников ЧР;

-выработаны рекомендации по выбору основных параметров испытания диэлектриков;

-разработаны алгоритм и программа для компьютерной имитации ЧР;

-предложен экспресс-метод оценки размеров дефекта по фазе

появления импульсов ЧР;

-разработан комплекс подпрограмм для расчета электрического поля в системе, содержащей тонкие заряженные слои на границах сред, в том числе в комплексе "металлические электроды- твердые (жидкие) диэлектрики- газовые дефекты";

На защиту выносятся:

1.Теоретические положения неразрушающего контроля и диагностики состояния диэлектрических материалов и изделий на основе анализа параметров ЧР:

-обобщенная математическая модель чередования импульсов ЧР;

-соотношения между характеристиками ЧР и электрофизическими параметрами дефекта объекта;

-метод решения прямой и обратной задач контроля и диагностики изоляции.

2.Методики расчета пространственно- временного распределения квазистатического электрического поля в системе "металлические электроды- твердые диэлектрики- газовые дефекты" :

-формулировка краевой задачи расчета электрического поля для сред, содержащих тонкие граничные слои;

-аналитические решения задачи расчета электрического поля для случаев канонической формы дефекта;

-численные алгоритмы расчета электрического поля;

-математические модели газового дефекта, вызывающего ЧР в твердом диэлектрике.

3.Методы автоматической идентификации дефектов- источников ЧР в диэлектрике, основанные на

-применении моделей нейроподобной сети с прямыми и обратными связями;

-модифицированном алгоритме обучения многослойного

персептрона, учитывающем динамику скорости обучения;

-построении регрессионных моделей данных о ЧР и факторном анализе.

4.Методология и реализация аппаратно-программного обеспечения системы контроля и диагностики состояния изоляции на основе ПК IBM PC AT.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции "Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной, силовоточной и полупроводниковой техники" (г.Москва, 1989); Научно-технических совещаниях "Новые разработки в области электрической изоляции" (г.Харьков, 1990, 1991г); VI всесоюзном научно-техническом совещании "Повышение качества и улучшение технико-экономических показателей силовых конденсаторов и комплектных конденсаторных установок" (Серпухов- 1991г); Научно-техническом совещании по технике высоких напряжений и электрической изоляции (г.Москва, 1992г); Международной научно-технической конференции "ДИЭЛЕКТРИКИ-93", (г. Санкт-Петербург, 1993г); Международной научно-технической конференции по электрической изоляции и физике диэлектриков (США, 1993), IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP, 1993 (Pocono Manor, Pennsylvania, USA, 1993); IV международной научно-технической конференции по свойствам и приложениям диэлектрических материалов (Австралия, 1994), IEEE IV-th Conference on Properties and Applications of dielectric materials ICPADM (Queensland, Brisbane, Australia, 1994); Международной научно-технической конференции "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" (Харьков-Алушта, 1995); Международной научно-технической

конференции "Высокие технологии: моделирование, оптимизация, диагностика.- INTERPARTNER" (Харьков-Алушта, 1995).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 21 печатная работа.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (из 230 наименований) и приложения. Диссертация составляет 520 стр., в том числе 300 стр. машинописного текста и 121 стр. с рисунками и таблицами. Приложение выполнено на 76 стр., содержит 18 разделов, выводы формул, программы расчетов на ЭВМ, а также данные расчетов и экспериментов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и в виде краткой аннотации изложены основные результаты работы и выносимые на защиту положения. Приведена структура диссертации.

В первой главе рассмотрены характерные особенности проблемы контроля и диагностики диэлектриков. Приведена классификация существующих методов (разрушающего и неразрушающего контроля: акустических, оптических, радиоволновых, радиационных, электрических и др.). Дана аналитическая оценка возможностей и ограничений перечисленных методов и средств. С помощью такой оценки обоснована целесообразность исследований методов контроля на основе анализа сигналов ЧР. Рассмотрено современное состояние в области исследования ЧР, на основе чего определены направления теоретических и экспериментальных исследований.

Вторая глава посвящена теоретической основе контроля и диагностики диэлектриков по параметрам ЧР. Универсальность теоретических положений обеспечивается, с одной стороны, введением величины комплексной амплитуды импульса ЧР \dot{Q}

$$\dot{Q} = Q_0 e^{j\phi} \quad (1)$$

где Q_0 — амплитуда импульса ЧР, равная величине кажущегося заряда ЧР; ϕ — фаза испытательного синусоидального напряжения, при которой возникает данный ЧР, и применением обобщенных параметров η , ξ и τ , характеризующих свойства и конфигурацию электродов, диэлектрика и дефекта, с другой,

$$\eta = U_x U_3; \quad \xi = U_{II} U_3 \quad (2)$$

где U_x — напряжение на газовом дефекте с характерным размером x (т.е. размер в направлении вектора напряженности электрического поля); U_{II} , U_3 — напряжения зажигания и погасания разряда в дефекте; τ — постоянная времени растекания зарядов, оседающих на поверхности дефекта в результате разряда.

Для получения соотношения между \dot{Q} и (η, ξ, τ) предложены и исследованы обобщенные математические модели чередования импульсов ЧР на волне синусоидального напряжения (рис.1.). Разделены эти модели на детерминированные (статическую и динамическую) и статистическую. Статическая модель ($\eta = \text{const}$, $\xi = \text{const}$ и $\tau = \infty$)



Рис.1. К обобщенной модели чередования импульсов ЧР

соответствует классическому представлению о механизме возникновения разрядов при синусоидальном напряжении. На ее основе получены формулы для фазы и амплитуды параметра \dot{Q}

$$\Phi_1 = \text{Arctg} \left\{ \frac{1}{\eta} \left[1 - (1-\xi) \left\{ \text{Int} \left[\left(2\eta - (1+\xi) \right) / (1-\xi) \right] / 2 + 1/2 - (1-1) \right\} \right] \right\}; \quad (3)$$

$$Q_1 = (1-\xi) Q_x, \quad (4)$$

где $l=1,2,\dots,n$ - порядковый номер импульса ЧР из n разрядов, возникающих за полупериод приложенного напряжения; $Q_x = C_{\text{экр}} U_x$, здесь $C_{\text{экр}}$ - эквивалентная емкость, зависящая от конфигурации объекта и дефекта.

В свою очередь, динамическая модель ($\eta = \text{const}$, $\xi = \text{const}$ и $\tau = \text{const}$) позволяет учесть процесс растекания поверхностных зарядов и получить следующее рекуррентное выражение для фазы Φ_k

$$\Phi_k = \begin{cases} \text{Arctg} \frac{1}{\eta} \left\{ 1 + (1-\xi) \sum_{i=1}^{k-1} \text{sign}(\sin \Phi_i) \exp \left(-\frac{t_k - t_i}{\tau} \right) \right\} & \text{при } \Phi_k \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

$$\Phi_k = \begin{cases} \pi - \text{Arctg} \frac{1}{\eta} \left\{ 1 + (1-\xi) \sum_{i=1}^{k-1} \text{sign}(\sin \Phi_i) \exp \left(-\frac{t_k - t_i}{\tau} \right) \right\} & \text{при } \Phi_k \in \left(-\frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

Наличие сильного растекания зарядов приводит к двум следующим важным изменениям в процессе чередования ЧР по сравнению с традиционным представлением о фазах возникновения ЧР:

а) В пределе одного полупериода испытательного электрического напряжения все разряды, кроме первого всегда возникают раньше по сравнению со случаем без релаксации зарядов;

б) При переходе от одного полупериода к другому первый разряд полупериода возникает позже по сравнению со случаем отсутствия растекания зарядов.

Отметим так же, что (5) и (6) выражают влияние на фазу k -ого ЧР всех предыдущих $(k-1)$ разрядов, т.е. отражает всю предысторию

объекта. Кроме того, при $\tau \rightarrow \infty$ происходит компенсация электрического поля поверхностных зарядов противоположных знаков, в результате чего (5)-(6) совпадает с (3), т.е. динамическая модель превращается в статическую. Общей особенностью обоих случаев детерминированной модели является постоянство амплитуды ЧР.

Статистическая модель ($\eta = \text{const}$, $\xi \neq \text{const}$), в отличие от описанных, применяется для случая сильновыраженного стохастического характера ЧР. На ее основе получены следующие системы уравнений относительно фазы и амплитуды параметра Q_k :

а) Без учета растекания зарядов ($\tau = \infty$)

$$\left\{ \begin{aligned} \sin \phi_k + \frac{1}{a} \ln(1-F) - \sum_{i=1}^{k-1} \text{sign}(\sin \phi_i) [1-\xi_i] \eta_i = 1 \eta_k, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{0k} = C_x U_x [1-\xi_k] \left\{ \sin \phi_k - \sum_{i=1}^{k-1} \text{sign}(\sin \phi_i) [1-\xi_i] \eta_i \right\}; \end{aligned} \right. \quad (8)$$

б) С учетом растекания зарядов ($\tau = \text{const}$)

$$\left\{ \begin{aligned} \sin \phi_k + \frac{1}{a} \ln(1-F) - \sum_{i=1}^{k-1} \text{sign}(\sin \phi_i) \left[[1-\xi_i] \eta_i \right] \exp\left[-\frac{t_k - t_i}{\tau}\right] = 1 \eta_k \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{0k} = C_x U_x [1-\xi_k] \left\{ \sin \phi_k - \sum_{i=1}^{k-1} \text{sign}(\sin \phi_i) \left[[1-\xi_i] \eta_i \right] \exp\left[-\frac{t_k - t_i}{\tau}\right] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Здесь F - интегральная функция распределения времени (фазы) запаздывания разрядов Δ . Для системы (7)-(8) имеем (рис.2)

$$F(\Delta) = 1 - \exp\left\{-a \left[\sin(\phi_k + \Delta) - \sin \phi_k \right]\right\}, \quad (11)$$

где $a = \frac{1}{n_{T/2}} \cdot \frac{\eta}{(1-\xi)} \approx \frac{\eta}{2(\eta-\xi)}$; а для (9)-(10)

$$F(\Delta) = 1 - \exp\left\{-a \left[\sin(\phi_k + \Delta) - \sin \phi_k \right] - \left[\exp\left[-\frac{\Delta}{\omega\tau}\right] - 1 \right] \sum_{i=1}^{k-1} \text{sign}(\sin \phi_i) [1-\xi_i] \eta_i \exp\left[-\frac{t_0 - t_i}{\tau}\right]\right\}. \quad (12)$$

При исследовании стойкости диэлектрических полимеров к ЧР (например в системе электродов SIGRE-I и SIGRE-II) и при разработке кабельного сейсмодатчика на основе формирования электретного состояния с помощью ЧР, газовые дефекты обычно имеют вид поры, вытянутой поперек силовых линий электрического поля. В связи с этим для учета а) дискретности разрядов не только во времени но и в пространстве; б) перехода от импульсного к диффузионному характеру разряда; в) сильный стохастический характер разряда предложена и исследована эквивалентная схема замещения диэлектрика, основанная на модели линии с распределенными параметрами. Получены системы телеграфных уравнений в операторном виде, описывающих рассмотренную линию. Если в результате разряда на диэлектрической поверхности дефекта в момент $t=0$ оседает заряд с плотностью

$$\sigma(S, t=0) = \frac{1}{\sqrt{\pi S_0}} \sigma_0 \delta(S), \quad (13)$$

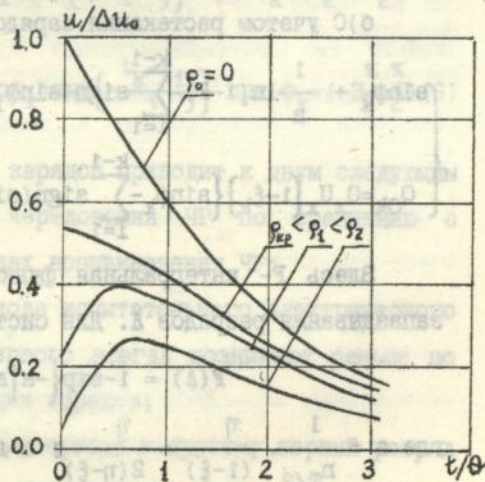
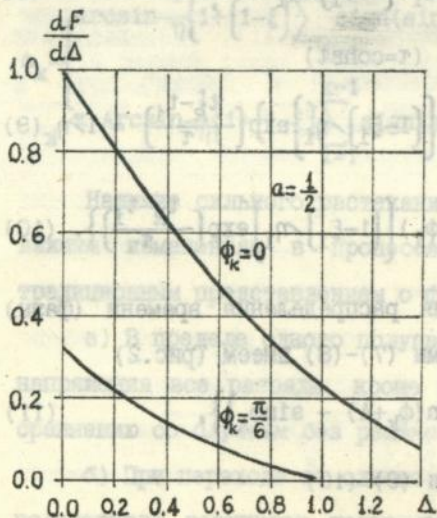


Рис.2. График функции плотности распределения времени запаздывания разрядов Δ .

Рис.3. Пространственно-временное распределение потенциала на поверхности дефекта.

где $\delta(\cdot)$ - дельта-функция, отражающая осаждение заряженных частиц на диэлектрической поверхности дефекта; S_0 - характерная разрядная площадь; т.е. разряд представляет собой сосредоточенный (в пространственном смысле) источник зарядов $\frac{1}{S_0\sqrt{\pi}} \sigma_0$, Кл/м², в точке

$S=0$, то решение полученной системы позволяет получить следующее выражение для электрического потенциала в точке S поверхности дефекта

$$u(S, t) = U_{Om} \sin(\omega t + \psi) + \frac{\Delta u_0}{\sqrt{(t-\theta)+1}} \exp\left\{-\frac{\rho^2}{(t-\theta)+1} - t\tau\right\}, \quad (14)$$

$$\text{где } U_{Om} = \frac{\sqrt{[G_1 + (\omega^2 C C_1 / G)]^2 + \omega^2 [C_1 - (C G_1 / G)]^2} / G}{1 + [\omega^2 C^2 / G^2]} U_m; \quad \Delta u_0 = \frac{\sigma_0}{C_1};$$

$$\text{tg}\psi = \frac{[G_1 + (\omega^2 C C_1 / G)]}{\omega [C_1 - (C G_1 / G)]}; \quad \rho = S/S_0; \quad \theta = R_S C \cdot (S_0 / 2)^2; \quad \tau = C/G;$$

C_1 и C_2 - емкости единицы поверхности диэлектрика относительно электродов 1 и 2 соответственно, Ф.м⁻²; $C = C_1 + C_2$; G_1 и G_2 - объемные электрические проводимости столба диэлектрика и газа высотой h_1 и h_2 и единичной площадью, См.м⁻²; $G = G_1 + G_2$; R_B - поверхностное сопротивление единицы поверхности диэлектрика, Ом.м⁻². Здесь было предположено, что под воздействием химических продуктов разложения газа и диэлектрика или из-за влажности поверхностный слой дефекта становится неполяризуемым, следовательно, поверхностная емкость соседних единиц поверхности диэлектрика C_S принята равной нулю. На рис.3 приведен график "переходной" составляющей пространственно-временного распределения потенциала поверхности дефекта по (14),

здесь $\rho_{кр} = \sqrt{(1/2) + (\theta/\tau)}$. В случае наличие множества очагов разряда, (14) имеет вид

$$u(\rho, t) = U_{0m} \sin(\omega t + \psi) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta u_i}{\sqrt{[(t-t_i)/\theta] + 1}} \exp\left\{ \frac{(\rho - \rho_i)^2}{[(t-t_i)/\theta] + 1} - (t-t_i)/\tau \right\} \quad (15)$$

где индекс "1" указывает на номер очага разряда.

На основе предложенных математических моделей разработаны методы решения прямой задачи диагностики диэлектрика. Одни из них основаны на непосредственном отыскании ожидаемой комплексной амплитуды импульса ЧР по (1)–(6). Другие опираются на компьютерной имитации процесса чередования ЧР с использованием (7)–(15). Описаны различные конструкции образцов, используемых для измерения параметров ЧР и сравнения экспериментальных данных с вычислительными. На рис. 4 представлен результаты имитации (а) (ЧР в одном дефекте) и экспериментов (б) (ЧР в нескольких источниках) в виде концов векторов амплитуды на комплексной плоскости.

Предложен метод решения обратной задачи, суть которого заключается в следующем. С одной стороны, обобщенные параметры η и ξ выражаются по формулам (рис. 5)

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{B}{(px)^m}\right]}; \quad \xi = \xi_0 \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{B}{(px)^m}\right]} \quad (16)$$

где $\eta_0 = [E/p] - [E/p]_{кр}$; $[E/p]_{кр}$, ξ_0 , B , m – характеристики газа в дефекте; p – давление газа в дефекте; x – размер дефекта в направлении напряженности электрического поля E .

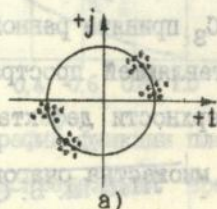


Рис. 4. Результаты экспериментов и компьютерной имитации ЧР.

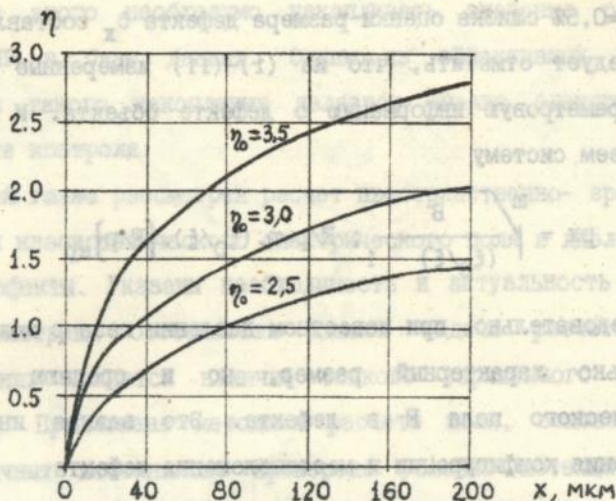


Рис.5. Зависимость η от характерного размера дефекта x .

С другой стороны, если ϕ_1 и ϕ_2 — фазы приложенного синусоидального напряжения, в которых возникают два первых импульса ЧР в каждом полупериоде, то для статического варианта

$$\eta = -\frac{1}{\frac{n}{2}\sin\phi_2 - (\frac{n}{2} - 1)\sin\phi_1}; \quad \xi = \frac{(\frac{n}{2} - 1)\sin\phi_2 - (\frac{n}{2} - 2)\sin\phi_1}{\frac{n}{2}\sin\phi_2 - (\frac{n}{2} - 1)\sin\phi_1}. \quad (17)$$

Из полученных выше выражений можно определить характерный размер дефекта при известном давлении p по формуле

$$x = \frac{1}{p} \sqrt{\frac{m}{(\xi_0/\xi) - 1}} \cdot B. \quad (18)$$

Например, при измеренных значениях фаз $\phi_1 = 5^\circ$ и $\phi_2 = 65^\circ$; $n=2$; для воздуха $[E/p]_{кр} = 25$ В/(м.Па); $\xi_0 = 0,2$; $B=8,6$ Па^{1/2}·м^{1/2}; $m=0,5$; давлении воздуха $p=10^5$ Па можно вычислить $\eta=1,1$; $\xi=0,1$ и соответственно размер дефекта $x=16,4$ мкм. При погрешности измерения

фазы $\delta_\phi = 0,5\%$ ошибка оценки размера дефекта δ_x составляет 1,6%.

Следует отметить, что из (1)-(11) измеренные фазы ЧР дают многопараметровую информацию о дефекте объекта. И так, в общем виде имеем систему

$$p_x = \sqrt{\frac{B}{(\xi_0/\xi) - 1}}; E/p = \eta \cdot (\xi_0/\xi) \cdot (E/p)_{кр}. \quad (19)$$

Следовательно, при известном давлении газа p можно определить не только характерный размер, но и среднюю напряженность электрического поля E в дефекте. Это важная информация для определения конфигурации и местоположения дефекта.

Для динамического варианта ($\tau = \text{const}$) получены следующие выражения для η и ξ

$$\eta = \frac{E_1 + E_2}{(1-E_3)\phi_1 + E_1\phi_2 + E_3\phi_n}; \xi = \frac{(1-E_3)\phi_1 - E_1\phi_2 + E_1\phi_3}{(1-E_3)\phi_1 + E_1\phi_2 + E_3\phi_n}, \quad (20)$$

а τ определяется с помощью уравнения

$$\begin{aligned} & (\phi_n - \phi_1) \exp\left[-\frac{(\phi_2 - \phi_1)}{\omega\tau}\right] + (\phi_n - \phi_2) \exp\left[-\frac{(T/2) - (\phi_n - \phi_1)\omega}{\tau}\right] - \\ & - \phi_2 \exp\left[-\frac{(\phi_n - \phi_1)\omega}{\tau}\right] + (\phi_n - 2\phi_2) \exp\left[-\frac{(T/2) - (\phi_2 - \phi_1)\omega}{\tau}\right] + \\ & + \phi_1 \exp\left[-\frac{(\phi_n - \phi_2)\omega}{\tau}\right] + \phi_1 \exp\left[-\frac{T/2}{\tau}\right] + (\phi_n - \phi_1) \exp\left[-\frac{(T/2) - (\phi_n - \phi_2)\omega}{\tau}\right] = 0, \quad (21) \end{aligned}$$

где T - период приложенного напряжения; $E_1 = \exp\left[-\frac{T/2 - (\phi_3 - \phi_1)\omega}{\tau}\right]$;

$E_2 = \exp\left[-\frac{(\phi_2 - \phi_1)}{\omega\tau}\right]$; $E_3 = E_1 E_2$; $\phi_1 = \sin\phi_1$, $1=1,2,\dots,n$. После определения

τ , η и ξ , отыскание решения осуществляется аналогично случаю статической модели.

Что касается статистического варианта, то обратную задачу целесообразно решить с помощью аппаратов теории распознавания

образов. Для этого необходимо накапливать значения различных параметров ЧР в базе данных. Одним из эффективных способов осуществления такого накопления является анализ электрического поля в объекте контроля.

В третьей главе рассмотрен расчет пространственно-временного распределения квазистатического электрического поля в диэлектрике, содержащем дефекты. Указаны необходимость и актуальность решения задачи. Рассмотрены особенности данной задачи расчета поля. Главной из них является наличие тонкого заряженного слоя на границе сред. Предложена методика расчета поля, основанная на методе вторичных источников. Проверено условие потенциальности электрического поля в рассмотренной системе (рис.6а). К примеру, при диапазоне изменения параметров

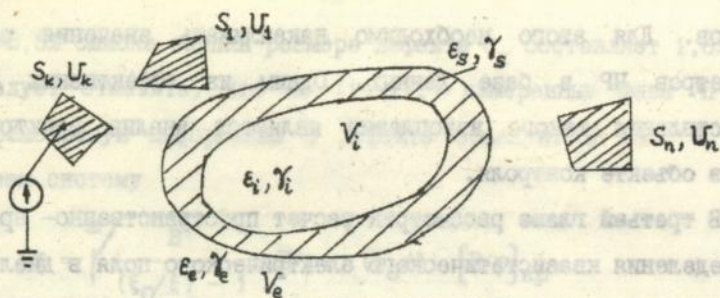
$$0 \leq \gamma_1, \gamma_e \leq 10^{-7} \text{ См.м}^{-1} \quad ; \quad 0 \leq \omega/2\pi \leq 10^6 \text{ Гц};$$

$$\epsilon_0 \leq \epsilon_e \leq 5000\epsilon_0 \text{ Ф/м} \quad ; \quad 10^{-12} \leq V_1/l_1 \ll V_e/l_e, S_k \leq 10 \text{ м};$$

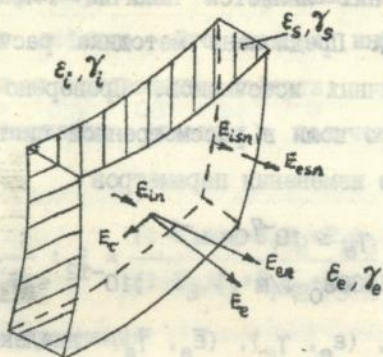
где (ϵ_1, γ_1) , (ϵ_e, γ_e) , $(\bar{\epsilon}_s, \bar{\gamma}_s)$ - диэлектрические проницаемости и удельные проводимости газа, твердого диэлектрика и граничного слоя V_1 и V_e - области, занимаемые дефектом и твердым диэлектриком соответственно; l_1, l_e - характерные размеры дефекта и твердый диэлектрик; S_k ($k=\bar{1}, \bar{n}$) - площадь k -ого электрода, имеющего фиксированный потенциал U_k ; ω - угловая частота внешнего поля; ϵ_0, μ_0 - диэлектрическая и магнитная постоянные, отношение напряженности потенциального поля \vec{E}_Π и вихревого \vec{E}_B равно

$$|\vec{E}_B/\vec{E}_\Pi| = \frac{(\gamma_1 \frac{V_1}{l_1} + \gamma_e (\frac{V_e}{l_e} + S_k))^2 + \omega^2 \epsilon_e^2 S_k^2}{16\pi^2 \mu_0^2 \omega^4 (\gamma_1 \frac{V_1}{l_1} + \gamma_e \frac{V_e}{l_e})^2} \ll 1. \quad (22)$$

На основе уравнения непрерывности плотности зарядов, теоремы Гаусса и материальных уравнений, применительных к граничному слою



а)



б)

Рис.6. К проверке потенциальности поля (а); Векторы напряженности поля на граничном слое (б).

(рис.6б), сформулирована краевая задача для потенциала φ в операторной форме

$$\Delta\varphi = 0 \text{ вне } S \text{ и } S_k \quad (k=\overline{1, n}); \quad (23)$$

$$\varphi_i = \varphi_e \text{ на } S; \quad (24)$$

$$\varphi = U_k \text{ на } S_k \quad (k=\overline{1, n}); \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_0 \varepsilon_1(p) \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} - \varepsilon_0 \varepsilon_e(p) \frac{\partial \varphi_e}{\partial n} - \operatorname{div} [\varepsilon_0 \varepsilon_s(p) \operatorname{grad}_t \varphi] - \sigma_0 / p = 0 \text{ на } S, \end{array} \right. \quad (26)$$

где S — поверхность дефекта; $\varepsilon(p) = \varepsilon + [\gamma / (\varepsilon_0 p)]$ — операторная эквивалентная диэлектрическая проницаемость; σ_0 — поверхностная плотность начального распределения заряда на стенке дефекта;

grad_τ - тангенциальная составляющая градиента.

Применяя метод вторичных источников, вводя простой слой зарядов с плотностью $\sigma^*(S)$ на границе S , слой с плотностью $\sigma_k(S_k)$ на электродах и заменяя все остальное пространство однородной средой с характеристикой $\epsilon_e(p)$, получаем интегральное уравнение Фредгольма II рода (ИУФ-II)

$$\sigma^*(Q) - \lambda_1 \int_S \sigma^*(M) \kappa(Q, M) \delta S_M = f(Q) \quad (27)$$

с ядром

$$\kappa(Q, M) = -\frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r_{QM}} \right) + \frac{1}{\lambda_1} \text{grad}_\tau \left(\frac{1}{r_{QM}} \right) \text{grad}_\tau \lambda_S(Q) + \frac{\lambda_S(Q)}{\lambda_1} \cdot \text{div} \left[\text{grad}_\tau \left(\frac{1}{r_{QM}} \right) \right] \right\} \quad (28)$$

и правой частью

$$f(Q) = 2\lambda_2 \sigma_0(Q) / p - 2\epsilon_0 \epsilon_e \lambda_1 \frac{\partial \phi_0(Q)}{\partial n} + \epsilon_0 \epsilon_e \text{div} \left[2\lambda_S(Q) \text{grad}_\tau \phi_0(Q) \right], \quad (29)$$

где r_{QM} - расстояние от точки M на поверхности S до точки наблюдения Q ; \vec{n} , $\vec{\tau}$ - векторы нормали и касательной к точке Q ; $\phi_0(Q)$ - потенциал, созданный внешним полем; $\gamma_S = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} (\Delta n \cdot \vec{\gamma}_S)$;

$$\epsilon_S = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} (\Delta n \cdot \vec{\epsilon}_S); \quad \lambda_1 = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_e}{\epsilon_1 + \epsilon_e}; \quad \lambda_2 = \frac{\epsilon_e}{\epsilon_1 + \epsilon_e}; \quad \lambda_S = \frac{\epsilon_S}{\epsilon_1 + \epsilon_e}.$$

На основе общего решения краевой задачи

$$\phi(Q) = \phi_0(Q) + \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_S} \left\{ \int f(M) + \lambda_1 \int_S R(M, N, \lambda_1) f(N) \delta S_N \right\} \frac{\partial S_M}{r_{QM}}, \quad (30)$$

где $R(M, N, \lambda_1)$ - резольвента ИУФ-II (27), получены следующие аналитические решения для случая сферического дефекта.

а) при правой части $f(\theta, \alpha) = 2\lambda_2 \sigma_0(\theta, \alpha)$, что соответствует тому случаю, когда внешнее поле отсутствует а заряд пятна в момент $t=0$ распределяется по закону $\sigma_0(\theta, \alpha)$.

$$\varphi = \frac{1}{4\pi R} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{R}{r}\right)^{n+1}}{\left(\frac{R}{r}\right)^n} \sigma_n^m(\alpha) \frac{(2n+1)P_n^m(\cos\theta)}{[\varepsilon_1 + (n+1)\varepsilon_e + n(n+1)\varepsilon_s]} \exp\left[-t/\tau_n^0\right] + \sum_{m=1}^n 2 \frac{\delta(m)(n-m)!}{(n+m)!} \times$$

$$\chi \sigma_n^m(\alpha) P_n^m(\cos\theta) \left\{ \frac{2}{\varepsilon^+} \exp\left[-t/\tau^+\right] + \frac{1}{\varepsilon_{2n}^m} \frac{[\varepsilon_{2n}^m \gamma_{1n}^m - \varepsilon_{1n}^m \gamma_{2n}^m]}{[\gamma^+ \varepsilon_{2n}^m - \varepsilon^+ \gamma_{2n}^m]} \exp\left[-t/\tau_n^m\right] \right\}, \quad (31)$$

где $\sigma_n^m(\alpha) = \int \int_{\mu \beta=0}^{\pi \ 2\pi} \sigma_0(\mu, \beta) P_n^m(\cos\mu) \cos m(\alpha - \beta) \sin\mu d\mu d\beta$; P_n^m - присоединенный полином Лежандра; $\delta(m) = \begin{cases} 0 & \text{при } m=0; \\ 1 & \text{при } m>0; \end{cases}$ $\varepsilon^+ = \varepsilon_1 + \varepsilon_e$; $\gamma^+ = \gamma_1 + \gamma_e$;

$$\chi_{1n}^m = (2n+2)\chi_1 + (2n)\chi_e - \left[\frac{n(n+1)}{m+1} - m^2 - m + (n-m)(n+m+1) \right] \chi_s;$$

$$\chi_{2n}^m = (2n)\chi_1 + (2n+2)\chi_e + \left[\frac{n(n+1)}{m+1} - m - m + (n-m)(n+m+1) \right] \chi_s; \chi = \varepsilon, \gamma$$

$$\tau^+ = \varepsilon^+ / \gamma^+; \tau_n^m = \varepsilon_{2n}^m / \gamma_{2n}^m.$$

б) при наличии переменного внешнего поля $E_0(t) = E_0 \sin \omega t$

$$\varphi_1(t) = -3E_0 r \cos\theta \left\{ \frac{(\gamma_1 - 2\gamma_e + 2\gamma_s)^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_1 - 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s)^2}{(\gamma_1 + 2\gamma_e + 2\gamma_s)^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s)^2} \sin(\omega t + \delta_1) + \right.$$

$$\left. \frac{(\gamma_1 - 2\gamma_e + 2\gamma_s)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s) - (\gamma_1 + 2\gamma_e + 2\gamma_s)(\varepsilon_1 - 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s)}{(\gamma_1 + 2\gamma_e + 2\gamma_s)^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s)^2} \exp[-at] \right\}, \quad (32)$$

$$\varphi_e(t) = -E_0 \cos\theta \left\{ r - R \left[\frac{R}{r} \right]^2 \left\{ \frac{(\gamma_1 - \gamma_e - 2\gamma_s)^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_e - 2\varepsilon_s)^2}{(\gamma_1 + 2\gamma_e + 2\gamma_s)^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s)^2} \sin(\omega t + \delta_e) \right. \right.$$

$$\left. + \frac{(\gamma_1 - \gamma_e - 2\gamma_s)\omega \varepsilon_0 (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s) - (\gamma_1 + 2\gamma_e + 2\gamma_s)\omega \varepsilon_0 (\varepsilon_1 - \varepsilon_e - 2\varepsilon_s)}{(\gamma_1 + 2\gamma_e + 2\gamma_s)^2 + \omega^2 (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s)^2} \exp[-at] \right\}, \quad (33)$$

$$\delta_1 = \arctg \left\{ \omega \varepsilon_0 \frac{(\varepsilon_1 - 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s)}{(\gamma_1 - 2\gamma_e + 2\gamma_s)} \right\} - \arctg \left\{ \omega \varepsilon_0 \frac{(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s)}{(\gamma_1 + 2\gamma_e + 2\gamma_s)} \right\}; \quad (34)$$

$$\delta_e = \arctg \left\{ \omega \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_e - 2\varepsilon_s)}{(\gamma_1 - \gamma_e - 2\gamma_s)} \right\} - \arctg \left\{ \omega \frac{(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_e + 2\varepsilon_s)}{(\gamma_1 + 2\gamma_e + 2\gamma_s)} \right\}. \quad (35)$$

На основе найденных решений анализировано влияние повышенной величины поверхностной электрической проводимости на сдвиг фазы между внешним полем и полем внутри сферического дефекта. Установлено условие применимости метода разделения переменных (МРП) для данной краевой задачи. С помощью МРП получены аналогичное аналитическое решение для цилиндрического дефекта. К примеру, для начального распределения зарядов $\sigma_0(z, \theta)$ решение имеет вид

$$\varphi = \frac{1}{2\pi^2 R} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma_m^\lambda(z, \theta) \exp(-\alpha_m t)}{\lambda \left[J_m' N_m \varepsilon_1 - J_m N_m' \varepsilon_e + K_m \varepsilon_s \right]} \begin{cases} J_m(\lambda r) N_m(\lambda R) & , r \leq R \\ J_m(\lambda R) N_m(\lambda r) & , r \geq R \end{cases} d\lambda, \quad (36)$$

$$\alpha_m = 2\pi \int_{\theta=0}^{2\pi} \int \sigma_0(w, \xi) e^{-|z-w|\lambda} \sin m(\theta - \xi) dw d\xi;$$

$$\alpha_m = \frac{J_m' N_m \gamma_1 - J_m N_m' \gamma_e + N_m K_m \gamma_s}{J_m N_m \varepsilon_1 - J_m N_m' \varepsilon_e + N_m K_m \varepsilon_s}; \quad K_m = J_m'' + J_m'/R; \quad R - \text{радиус цилиндра}; \quad J_m, N_m -$$

цилиндрические функции Бесселя и Неймана m -ого порядка (функции от переменной λR там, где не указаны другие).

Получена система ИУФ-II, описывающая распределение электрического поля в случае наличия в диэлектрике множества дефектов. Разработан численный алгоритм решения ИУФ-II (27). Он основан на полученном из (27) дискретном во времени ИУФ-II

$$\sigma(Q, t_n) - \lambda_1 \int_S \sigma(M, t_n) \kappa(Q, M, t_n) dS_M = f(Q, t_n); \quad Q \in S, \quad (37)$$

$$\text{где } \kappa(Q, M, t_n) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{r_{QM}} \right] + \frac{1}{\lambda_1} \operatorname{div} \left[\lambda_S(Q) \operatorname{grad}_T \left[\frac{1}{r_{QM}} \right] \right] \right\} \quad (38)$$

и правой частью

$$f(Q, t_n) = 2\varepsilon_0 \varepsilon_e \left\{ \lambda_1 E_{OH}^-(Q, t_n) + \operatorname{div} \left[2\lambda_B(Q) E_{OT}^-(Q, t_n) \right] \right\} + g_{n-1}(Q) \quad (39)$$

где

$$g_{n-1}(Q) = g_{n-2}(Q) + \left\{ 2\lambda_2 \left\{ E_{OH}^-(Q, t_{n-1}) + \operatorname{div} \left[\gamma_B(Q) E_{OT}^-(Q, t_{n-1}) \right] - \right. \right. \\ \left. \left. - \sigma(Q, t_{n-1}) / \lambda_2 - E_{H}^-(Q, t_{n-1}) - \operatorname{div} \left[\gamma_S(Q) E_T^-(Q, t_{n-1}) \right] \right\} \right\} \cdot \Delta t_{n-1} \text{ и } g_0 = 2\lambda_2 \sigma_0(Q) \quad (40)$$

здесь использованы следующие обозначения

$$\lambda_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon^- + \gamma^- \Delta t_n / 2}{\varepsilon_0 \varepsilon^+ + \gamma^+ \Delta t_n / 2}; \quad \lambda_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_e}{\varepsilon_0 \varepsilon^+ + \gamma^+ \Delta t_n / 2}; \quad \lambda_B = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_S + \gamma_S \Delta t_n / 2}{\varepsilon_0 \varepsilon^+ + \gamma^+ \Delta t_n / 2}; \\ \varepsilon^\pm = \varepsilon_1 \pm \varepsilon_e; \quad \gamma^\pm = \gamma_1 \pm \gamma_e; \quad 2^{\delta(k)} = \begin{cases} 2 & \text{если } k=0 \\ 1 & \text{если } k>0 \end{cases} \quad (41)$$

Исследована также устойчивость решения в зависимости от соотношения электрофизических характеристик сред (γ, ε) и шага дискретизации по времени и установлен критерий устойчивости. К примеру, при $\gamma^+ = \gamma^- = 0$; $\varepsilon_S = 0$; $\Delta t_n = 0,001$ сек; $R = 10^{-2}$ м; $\lambda_{кр} = 0,1$, предельная величина $\bar{\gamma}_S$ составляет примерно 10^{-6} см. Разработанная методика представляет самостоятельный интерес в связи с возможностью ее применения для задач, возникающих при исследовании и проектировании электретных датчиков и для анализа переходного процесса в высоковольтных изоляционных конструкциях.

В конце главы рассмотрены математические модели газового дефекта в трех основных процессах в контексте ЧР: возникновение и развитие разряда, индуцирование зарядов на металлических электродах и растекание поверхностных зарядов, осевших на стенке дефекта в результате ЧР. Приведена методика решения системы уравнений непрерывности частиц и уравнения Пуассона, описывающей возникновение и развитие разряда.

Четвертая глава посвящена разработке методов автоматической идентификации дефектов-источников ЧР. Обоснован и исследован метод

распознавания дефектов с использованием нейроразнообразной сети (НС) прямой и симметричной структуры для случая наличия в объекте несколько источников ЧР.

Введены и исследованы самые информативные входные образы для НС: амплитудное, фазовое, амплитудно-фазовое и другие распределения импульсов ЧР. На основе стохастического подхода исследована возможность НС с ансамблевой структурой в идентификации ЧР. Разработана методика кодирования входных данных о ЧР для данной модели НС (рис.7а). Она заключается в следующем. Входной образ ЧР содержит $NX=NQ \times NP$ признаков, каждый из которых соответствует определенному амплитудно-фазовому окну (АФО) с номером (iq, jp) , $iq=1, NQ$, $jp=1, NP$. Каждый признак принимает одно из значений $0, \Delta n, 2\Delta n, \dots, (NQ-1)\Delta n$, где NQ — число градаций величины частоты импульсов ЧР в данном АФО и $\Delta n = NMAX/NQ$, здесь $NMAX$ — максимальная частота импульсов ЧР среди АФО. Обозначим через M_i , M_i^k и D_m маску i -ого АФО, маску числового значения, соответствующего k -ой градации i -ого АФО, и маску имени выходного образа (класса распознаваемого образа ЧР). Все перечисленные маски формируются с помощью n -мерного бинарного вектора с вероятностью единичной компоненты $P \ll 1$ (n — число нейронов сети). Для распознавания образов ЧР используется обучение с учителем. При этом входной вектор формируется из масок АФО, масок их числовых значений и маски имени класса по формуле

$$X_m = \bigcup_{i=1}^{NX} (M_i \& M_i^k) \cup D_m, \quad m=1, 2, \dots, NZ; \quad (42)$$

где X_m — n -мерный вектор, соответствующий коду m -ого класса источников ЧР; \cup — знак дизъюнкции и $\&$ — знак конъюнкции; NZ — число классов источников ЧР. Кроме того, формируется вектор состояния нейронов R_j , $j=1, n$, и матрица связей. При распознавании образов ЧР входной вектор формируется из масок АФО, масок их числовых

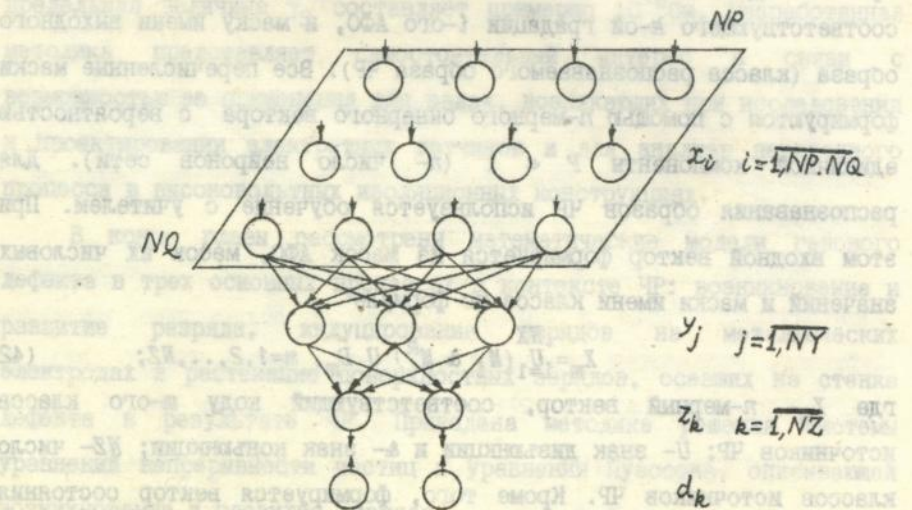
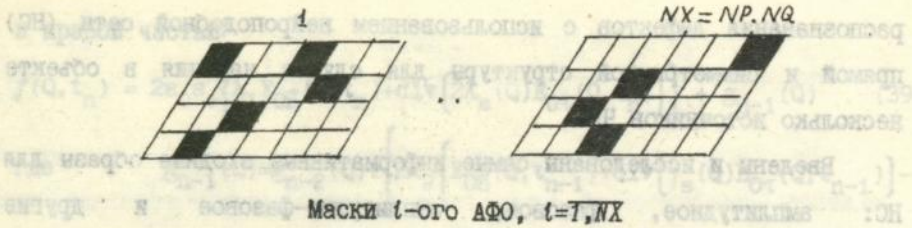


Рис.7. К кодированию данных о ЧР для нейрореподобной сети с ансамблевой структурой (а) и многослойного персептрона (б).

значений (без маски имени класса) по формуле

$$X = \bigcup_{i=1}^{NX} (M_i^L \& M_i^R). \quad (43)$$

Номер класса M , к которому принадлежит распознаваемый образ ЧР, определяется по формуле

$$M = \operatorname{arg\,max}_m \sum_{j=1}^n \left[D_m[fj] \& X[fj] \right]. \quad (44)$$

Проведены эксперименты по распознаванию трех типов источников ЧР: зашумленные внутренние разряды, внешние разряды и отдельные шумы без разрядов. Для обучения предъявлены серии, состоящие из 20 амплитудно-фазовых матриц импульсов ЧР от каждого из типов источников ЧР, причем порядок обучающих типов произволен. Результаты экспериментов показывают удовлетворительное качество обучения (85% правильных ответов).

Из моделей НС с прямыми связями рассмотрена возможность простого (двухслойного) и многослойного персептронов в решении поставленной задачи. Результаты численных экспериментов показывают, что даже простой персептрон способен решить несложную задачу идентификации дефектов, как распознавание источников ЧР на фоне шумов. С целью надежной идентификации ЧР при низком соотношении сигнал/шум или при наличии множества разнотипных дефектов, вместо простого целесообразно применить многослойный персептрон (рис.76). Здесь i, j, k - номера нейронов входного, скрытого и выходного слоя сети соответственно $i=1, NX; j=1, NY; k=1, NZ$; где NX, NY, NZ - количество нейронов входного, скрытого и выходного слоя сети; x_i, y_j, z_k - выходы i -ого, j -ого и k -ого нейронов; u_{ji}, w_{kj} - синаптические веса связи между j -м и i -м, k -м и j -м нейронами; d_k - желаемый выход k -ого нейрона выходного слоя. Теоретический и экспериментальный анализ показывает, что существующий алгоритм обучения многослойного персептрона,

основанный на методе обратного распространения ошибки, можно улучшить, если в ходе модификации синаптических связей производится и коррекция коэффициента, задающего скорость обучения ν . Получены уравнения относительно оптимальной скорости обучения для двух случаев:

а) для выходных слоев

$$\sum_{k=1}^{NZ} \delta_k \delta_k^* = 0, \quad (45)$$

где $\delta_k = [d_k - z_k] f'(a_k)$; $\delta_k^* = [d_k - z_k^*] f'(a_k^*)$; $a_k = \sum_{j=1}^{NY} w_{kj} y_j$ - активность k -ого нейрона; $f(\cdot)$ - активационная функция нейрона; знак "*" указывает на то, что соответствующая величина определяется после коррекции синаптических весов.

б) для скрытых слоев

$$\sum_{k=1}^{NZ} \left\{ \sum_{j=1}^{NY} [\Delta_{kj}^* w_{kj}] \sum_{R=1}^{NZ} [\Delta_{Rj} w_{Rj}] \right\} = 0, \quad (46)$$

где $\Delta_{kj}^* = \delta_k^* f'(b_j^*)$; $\Delta_{Rj} = \delta_R f'(b_j)$; $b_j = \sum_{i=1}^{NX} u_{ji} x_i$ - активность j -ого нейрона. Решение уравнений (45) и (46) может быть найдено методом золотого сечения в интервале $\nu = (0, 1)$. Для достижения точности $\epsilon > 0$

достаточно выполнить N итераций, где $N = \lg(1/\epsilon) / \lg\left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)$.

Эксперименты, проведенные с помощью разработанной программной приставки нейрокомпьютера к ПЭВМ IBM PC AT, показывают, что скорость ν колеблется в диапазоне $0+0,4$ и алгоритм обучения персептрона с модификацией ν позволяет уменьшить число циклов обучения в среднем от 20 до 30% по сравнению с традиционным алгоритмом в решении задачи идентификации источников ЧР. Рассмотрены также особенности применения других моделей нейрорподобных сетей к задаче идентификации ЧР, в том числе машина Больцмана.

С целью выделения информации об единичных дефектах из данных о множестве предложены и исследованы методики, основанные на факторном и регрессионном анализе. Многометодный подход здесь объясняется тем, что при наличии априорной информации о типах дефектов целесообразно применить регрессионный анализ, а в противном случае — факторный. Суть первой методики заключается в построении регрессионных моделей данных по амплитудно-фазовому распределению импульсов ЧР

$$f(q_i, \phi_j) = \sum_{m=1}^K n_m(q_i, \phi_j) \Psi_m + \varepsilon_{ij} \quad (47)$$

где $f(q_i, \phi_j)$ — частота импульсов ЧР, попадающих в амплитудно-фазовое окно (i, j) ; $i = \overline{1, NQ}$, $j = \overline{1, NP}$, $(i, j) = (i-1) \times NP + j$; $n_m(q_i, \phi_j)$ — частота импульсов ЧР, возникающих в дефекте m -ого типа (т.е. дефект, который имеет вектор-свойства, находящийся в интервале $[\tilde{r}_{min}^{*+(m-1)\Delta\tilde{r}}; \tilde{r}_{min}^{*+m\Delta\tilde{r}}]$) и попадающих в амплитудно-фазовое окно (i, j) , здесь \tilde{r}_{min}^{*} — вектор-свойства дефекта, являющегося нижним порогом активизации разряда при данном приложенном напряжении, $\Delta\tilde{r}^{*}$ — шаг дискретизации по вектору-свойства дефекта; Ψ_m — искомое число дефектов m -ого типа в объекте контроля; K — число типов активизируемых дефектов; ε_{ij} — погрешность, обусловленная ошибкой измерения $f(q_i, \phi_j)$, несогласованием вычисленного и истинного значений $n_m(q_i, \phi_j)$ и погрешностью дискретизации. Экспериментально выявлена неустойчивость решения задачи построения данной модели. Применение регуляризации по Тихонову А.Н. показывает повышение устойчивости решения. Для обеспечения универсальности рассмотренного алгоритма предложена методика с использованием регрессии на обобщенных параметрах. При этом переход от значений обобщенного параметра к соответствующим значениям вектора-свойств \vec{r} для конкретного случая дает

окончательную информацию о распределении дефектов в объекте контроля. К примеру, получены следующие выражения для осуществления перехода между функциями распределения сферических дефектов радиусом r

$$\phi(r) = \Psi(\eta) \frac{3\varepsilon_1 U_0}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \frac{1}{d} \frac{1}{2Bpr}, \quad (48)$$

где ε_1 , ε_2 — диэлектрические проницаемости газа и твердого диэлектрика; d , U_0 — толщина плоского образца и амплитуда приложенного к нему напряжения; p — давление газа, а для дефектов типа плоских включений толщиной r

$$\phi(r) = \Psi(\eta) \frac{U_0}{Bp} \frac{\left[1 - (\varepsilon_1/\varepsilon_2)\right] \ln\left[e \ln(1/\gamma)/(Apr)\right] + (\varepsilon_1/\varepsilon_2) \left[(d-r)/r\right]}{\left[\left(\varepsilon_1/\varepsilon_2\right)(d-r) + r\right]^2} \quad (49)$$

где A , B — некоторые константы, зависящие от природы газа в дефекте; γ — второй коэффициент Таунсенда.

Вторая методика, основанная на факторном анализе, заключается в следующем. Сначала формируется так называемый куб "наблюдение-окно" (трехмерный аналог таблицы "объект-признак") для вычисления корреляционной матрицы, каждый элемент которой представляет собой коэффициент корреляции между двумя АФО. По корреляционной матрице, с помощью факторного анализа определяются факторные нагрузки (веса), на основании которых разделяются окна на группы окон, каждая группа окон соответствует одному типу активизируемого дефекта. Рассмотрено две реализации методики. Эксперименты показывают лучший результат с точки зрения быстродействия при использовании оптимизационного алгоритма (максимизации функционала качества разбиения наблюдаемых АФО на агрегаты), чем при применении классического.

Пятая глава посвящена методологии разработки

аппаратно-программного обеспечения системы контроля и диагностики (СКД) состояния изоляции. Рассмотрены основные требования к разрабатываемой СКД и сформулированы принципы построения СКД, из которых главными являются принципы универсальности по времени (эволюции), аппаратно-программной избыточности и объектно-ориентированной структуры. Перечислены предпосылки для построения данной системы. На основе операторного преобразования получены математические модели основных сигналов о ЧР для датчиков (измерительных элементов) типа RC - и RCL - звеньев. Разработана структурная схема аппаратного обеспечения СКД электрической изоляции. В нее входят три канала ввода и один канал вывода, усилитель, делитель напряжения, устройство выборки-хранения, детектор пика, формирователь сигнала синхронизации, формирователь сигнала управления временем измерения, АЦП, ЦАП, нейроплата и ПК IBM PC AT. Принцип действия схемы заключается в следующем. Сигналы об условиях контроля и статических характеристиках объекта поочередно поступают на АЦП и передаются в память ПК стандартным способом. Другие сигналы, несущие информацию о фазе и амплитуде импульсов частичных разрядов через устройство выборки-хранения и детектор пика поступают на АЦП с последующей передачей в память ПК через интерфейс. Рассмотрена реализация формирователя сигнала синхронизации на базе программируемого счетчика $t8253/8254$ (КР580ВИ53), работающего в режиме 1. Предложено и анализировано два способа реализации формирователя сигнала управления временем измерения. Первый основан на сравнении задаваемого интервала времени с текущим содержимым таймера. Начало отсчета синхронизируется с началом периода испытательного синусоидального напряжения. Такой метод может быть реализован с помощью внутреннего таймера $t8253/8254$ ПК IBM PC AT и программирования реального времени. Второй метод предполагает применение внешнего

счетчика 18253/8254 (режим задержания перепада "0" → "1"). Синхроимпульсы формируются из приложенного синусоидального напряжения. Анализ показывает преимущества данного метода по сравнению с первым в плане быстрей действия и точности.

Обоснован выбор режима прямого доступа к памяти (ПДП) для ввода сигнала о частичном разряде. Рассмотрена реализация ПДП с помощью канала 6 (16-разрядного) контроллера 18237 ПК типа IBM PC AT стандартной конфигурации. Отделена временная задержка при применении механизма прерывания для различных моделей IBM PC AT. Установлено, что из-за высокой частоты импульсов ЧР, для реализации режима прерывания требуется более совершенная модель IBM PC AT (на основе МП 80486 и выше).

Выяснено явление неопределенности фазы импульсов ЧР при применении метода измерения напряжения. Предложены два способа устранения этой неопределенности. Первый — программный способ — использует теоретическое положение о полярности импульсов ЧР и заключается в сравнении знака амплитуды импульса ЧР с полярностью приложенного напряжения. Второй способ — аппаратный — предполагает другой метод определения фазы импульсов ЧР — метод измерения интервала времени. Рассмотрена так же реализация последнего на основе таймера 18253/8254.

Показана неэффективность применения традиционного процедурного подхода к разработке программного обеспечения (ПО) таких сложных систем, как СКД электрической изоляции. Обоснован выбор объектно-ориентированной методологии для создания ПО данной системы. Рассмотрена доменная и поддоменная структура системы диагностики. В нее входят такие домены, как "измерение ЧР", "моделирование ЧР", "измерительные каналы", "база данных о ЧР", "обработка данных о ЧР", "экспертная подсистема" и другие. Приведены так же типичные

примеры модели состояний для характерных объектов структуры и диаграмма потоков данных действий для определенного состояния. В конце главы описана методика моделирования частичных разрядов с использованием объектно-ориентированного программирования и приведен анализ типичной иерархии объектов для разработки программы моделирования.

В шестой главе рассмотрены основные вопросы метрологии системы контроля и диагностики состояния электрической изоляции. Проведен анализ влияния статистической флуктуации измеряемых величин на погрешность идентификации дефектов. Обоснована методика оценки погрешности при использовании регрессионного анализа. Приведены практические рекомендации по выбору различных параметров испытания.

Разработана методика оценки погрешности измерения средней частоты импульсов ЧР $n_{\text{ЧР}}$. Выявлены основные источники ошибки измерения $n_{\text{ЧР}}$, в том числе неравномерность распределения импульсов ЧР по времени (квантовая природа ЧР) и наличие "мертвого времени" измерительной системы ("мертвое время" — это максимальный интервал между такими двумя соседними импульсами ЧР, которые прибор сосчитывает как один). Если обозначим через λ интенсивность появления импульсов ЧР, λ — постоянная величина и $t_{\text{изм}}$ — время измерения, причем предполагаем, что импульсы ЧР распределяются по закону Пуассона (ввиду естественно-квантовой природы возникновения импульсов), то случайная погрешность определения средней частоты импульсов ЧР за время $t_{\text{изм}}$ с доверительной вероятностью P вычисляется по формуле

$$\gamma_{n_{\text{ЧР}}} = \alpha_P \cdot \sigma(n_{\text{ЧР}}) / n_{\text{ЧР}} = \alpha_P / \sqrt{n_{\text{ЧР}} t_{\text{изм}}} \quad (49)$$

где α_P — доверительный множитель. Отсюда вытекает требование к минимальному времени измерения при заданной допустимой погрешности

$$t_{изм} \geq U_{нчр} / (4fU \gamma_{нчр}^2), \quad (50)$$

где $U_{нчр}$, U - напряжение начала ЧР и приложенное к объекту напряжение; f - частота испытательного напряжения. Например, при $f=50\text{Гц}$; $U/U_{нчр}=1,5$ для обеспечения допустимой погрешности $\gamma_{нчр}=5\%$ время измерения должно быть больше, чем 1,3сек.

Кроме того, если обозначим τ_D - "мертвое время" измерительной системы то относительная погрешность при определении средней частоты импульсов ЧР, вызванная наличием τ_D системы, определяется выражением

$$\gamma_{нчр} = \frac{\tau_D n_{чр}}{1 + \tau_D n_{чр}}. \quad (51)$$

Например, при наличии мертвого времени τ_D порядка 10мкс , если измеряемая частота импульсов ЧР $n_{чр} \approx 10^2\text{имп/сек}$, то погрешность составляет 0,1%.

На основе разработанных в диссертации методик оценки погрешностей определения фаз ЧР установлено, что при использовании метода измерения напряжений наибольшая погрешность получена для значений фазы вблизи максимумов приложенного синусоидального напряжения, в то время как при методе измерения интервалов времени имеется максимальная погрешность для тех значений фазы вблизи нуля указанного напряжения. С другой стороны, согласно моделям следования ЧР и экспериментальным данным наибольшая плотность импульсов ЧР наблюдается вблизи нулей испытательного напряжения. Следовательно, предпочтение следует отдавать методу измерений напряжений (с последующим устранением явления неопределенности фаз ЧР). При этом получена формула для определения погрешности

$$\gamma_{\varphi} = \alpha_P \frac{tg\varphi}{\varphi} \gamma_U. \quad (52)$$

где γ_U - погрешность измерения напряжения. Вблизи нуля синусоидального напряжения, вместо (52) целесообразно

воспользоваться следующим выражением

$$\gamma_{\varphi} \Big|_{\varphi=0} = \alpha_P \frac{1}{1 + \cos^2 \varphi} \gamma_U \quad (53)$$

Получены следующие выражения для погрешностей оценки обобщенных параметров в зависимости от случайных погрешностей измерения фазы γ_{φ} и амплитуды γ_Q

$$\gamma_{\eta} = \alpha_P \frac{\sqrt{\left(\frac{n}{2} - 1\right)^2 \varphi_1^2 \cos^2 \varphi_1 + \frac{n^2}{4} \varphi_2^2 \cos^2 \varphi_2}}{\frac{n}{2} \sin \varphi_2 - \left(\frac{n}{2} - 1\right) \sin \varphi_1} \gamma_{\varphi}; \quad (54)$$

$$\gamma_{\xi} = \alpha_P \frac{(2n-1) \sqrt{\varphi_2^2 \sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2 - \varphi_1^2 \sin^2 \varphi_2 \cos^2 \varphi_1}}{\left[\frac{n}{2} \sin \varphi_2 - \left(\frac{n}{2} - 1\right) \sin \varphi_1\right] \left[\left(\frac{n}{2} - 1\right) \sin \varphi_2 - \left(\frac{n}{2} + 2\right) \sin \varphi_1\right]} \gamma_{\varphi}; \quad (55)$$

$$\gamma_{Q_x} = \alpha_P \sqrt{\gamma_Q^2 + \frac{(\varphi_1 \cos \varphi_1 - \varphi_2 \cos \varphi_2)^2}{(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)^2} \gamma_{\varphi}^2} \quad (56)$$

Кроме того, оценка точности восстановления характерных размеров дефекта γ_x (по фазовым параметрам) осуществляется по формулам, одна из которых имеет следующий вид

$$\gamma_x = \left(1 + \frac{(px)^n}{nB}\right) \frac{\left(\frac{n}{2} - 1\right) \varphi_1 \cos \varphi_1 - \frac{n}{2} \varphi_2 \cos \varphi_2}{\frac{n}{2} \sin \varphi_2 - \left(\frac{n}{2} - 1\right) \sin \varphi_1} \gamma_{\varphi} \quad (57)$$

С целью анализа влияния статистической природы разряда на точности восстановления функции распределения дефектов (ФРД) объекта предложена вероятностная модель экспериментальных данных (амплитудно-фазовое распределение импульсов ЧР) и восстановленных данных, описываемая смесью истинного сигнала и шумового статистического процесса, имеющего нулевое среднее и некоторую дисперсию. На основе анализа таких моделей данных и математической модели процесса восстановления ФРД получено выражение, связывающее погрешность экспериментальных данных γ_f и погрешность восстановленной функции распределения дефектов γ_{Φ}

$$\gamma_{\Phi(r)} \approx \alpha_P \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NQ} \sum_{j=1}^{NP} f^2(t, j)}{(\hat{\Phi} \Delta r)} \sqrt{\sum_{i=1}^{NQ} \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NR} n^2(t, j, k)}} \right] \gamma_f \quad (58)$$

Отсюда вытекает требование к уровню испытательного напряжения при заданных допустимых погрешностях γ_f и $\gamma_{\Phi(r)}$

$$U \geq \frac{1}{4f} \sqrt{\sum_{i=1}^{NQ} \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NR} n^2(t, j, k)} \left[\frac{\gamma_{\Phi(r)}}{\gamma_f} \right] U_{нчр} \quad (59)$$

Например, при $\sqrt{\sum_{i=1}^{NQ} \sum_{j=1}^{NP} \sum_{k=1}^{NR} n^2(t, j, k)} = 50$, $\left[\frac{\gamma_{\Phi(r)}}{\gamma_f} \right] = 10$, $f = 50 \text{ Гц}$,

имеем $U \geq 2,5 U_{нчр}$.

В конце главы рассмотрены вопросы чувствительности методов измерения и восстановления параметров дефекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная диссертационная работа посвящена решению важной народнохозяйственной проблемы — созданию новых методов и устройств неразрушающего контроля и диагностики состояния диэлектрических материалов и изделий на основе анализа параметров ЧР. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили создать научные основы разработки, проектирования и внедрения системы контроля и диагностики электроизоляционных материалов и конструкций.

1. Разработаны теоретические положения неразрушающего контроля и диагностики состояния диэлектрических материалов и изделий на основе анализа параметров частичного разряда (ЧР). В основу теории положена математическая модель "аппаратно-программной системы диагностики-объекта контроля". Универсальность модели обеспечивается, с одной стороны, применением величины комплексной амплитуды частичного разряда, несущей информацию о амплитуде и

фазе импульса ЧР, и введением обобщенных параметров, характеризующих свойства и конфигурацию электродов, диэлектрика и дефекта, с другой.

2. Разработаны обобщенные математические модели чередования импульсов частичных разрядов на волне синусоидального напряжения. Показано, что в отличие от статической, динамическая модель позволяет учесть процесс растекания поверхностных зарядов а статистическая модель отражает большой разброс характеристик ЧР, основная причина которого заключается в случайном возникновении первичного электрона, инициирующего разряды.

3. С помощью предложенных моделей разработана методика решения обратной задачи, основанная на отыскании значений обобщенных параметров по измеренным значениям комплексной амплитуды ЧР. Переход от обобщенных параметров к электрофизическим характеристикам диэлектриков позволяет получить информацию не только о конфигурации и размерах газовых дефектов но и о степени разрушения материалов под воздействием ЧР. Разработаны алгоритм и программа компьютерной имитации процесса чередования ЧР. Они используются для решения прямой задачи контроля твердых диэлектриков и для накопления базы данных о комплексной амплитуде ЧР.

4. Выявлены особенности задачи расчета квазистатического электрического поля в системе "твердый диэлектрик- газовые дефекты- металлические электроды". Полученная в работе система интегральных уравнений Фредгольма в операторной форме позволяет определить аналитические решения в случаях канонической формы дефектов (сфера, цилиндр и т.д.). Установлено также условие применимости метода разделения переменных для отыскания аналитических решений задачи.

5. Разработаны численный алгоритм и программа расчета пространственно-временного распределения электрического поля в твердом диэлектрике для случаев произвольной формы дефекта. Установлено простое формальное преобразование интегрального уравнения Фредгольма (ИУФ) II рода из операторной области во временную. Получены выражения для раскрытия неопределенности ядра ИУФ. На основе численных экспериментов, оценки погрешности расчета и теоретического анализа ядра интегрального уравнения, получены выражения для определения критических с точки зрения устойчивости решения значений шага дискретизации по времени и электрофизических параметров сред, в частности, удельной электрической проводимости.

6. Получена также система интегральных уравнений Фредгольма, решение которой позволяет анализировать распределение электрического поля в изоляционных конструкциях, в которых имеются сложная система электродов, несколько разных твердых диэлектриков и множества газовых дефектов. Рассмотрено три основных процесса в газовом дефекте твердого диэлектрика: возникновение и развитие газового разряда под воздействием приложенного напряжения, образование поверхностных зарядов на стенке дефекта и индуцированных зарядов на электродах, растекание осевших зарядов по объему и по поверхности диэлектрика.

7. Разработаны методы решения задачи автоматической идентификации газовых дефектов твердого диэлектрика с помощью нейрноподобной сети (НС). Введены и исследованы самые информативные входные образы ЧР для НС. Описана также методика кодирования данных о ЧР для НС с ансамблевой структурой. Эксперименты показывают, что даже простой перцептрон способен решить несложную задачу идентификации дефектов, как распознавание источников ЧР на фоне шумов. Предложен модифицированный алгоритм обучения

многослойного персептрона, основанный на методе обратного распространения ошибки и заключающийся в коррекции не только синаптических весов между нейронами но и скорости обучения.

8. Для разложения суммарных измеряемых данных о ЧР на элементарные данные, несущие отдельную информацию о единичных источниках ЧР предложены методики, основанные на факторном и регрессионном анализе. Показано, что в большинстве случаев задача восстановления функции распределения дефектов по регрессионной модели амплитудно-фазовых характеристик ЧР является некорректно поставленной и для повышения устойчивости решения необходимо применить методы регуляризации, например, по А.Н. Тихонову. Описаны эвристический подход к анализу АФР.

9. Разработана структурная схема аппаратного обеспечения системы контроля и диагностики (СКД) состояния электрической изоляции. Реализована СКД на базе ПК IBM PC AT. Обоснован выбор режима прямого доступа (ППД) к памяти для ввода сигнала о частичном разряде. Рассмотрена реализация ППП с помощью канала 6 (16-разрядного) контроллера 18237. Выяснено явление неопределенности фазы импульсов ЧР при применении метода измерения напряжения. Предложены программный и аппаратный способы устранения этой неопределенности. Обоснован выбор объектно-ориентированной методологии для создания программного обеспечения СКД состояния электрической изоляции.

10. Разработаны методики оценки погрешностей отдельных параметров ЧР: амплитуда, фаза и частота. Предложена методика оценки погрешностей определения обобщенных параметров и точности восстановления характерных размеров дефекта. Для анализа влияния статистической природы разряда на точность восстановления функции распределения дефектов (ФРД) изоляции, предложена вероятностная

модель экспериментальных данных. Получено выражение, связывающее погрешность экспериментальных данных γ_f и погрешность восстановленной функции распределения дефектов γ_Φ . Это выражение позволяет сформулировать требования к параметрам условия испытания при заданных допустимых погрешностях, в том числе требование ко времени измерения и уровню испытательного напряжения.

11. Проведены экспериментальные исследования диэлектрических изделий конденсаторного типа различных технологических исполнений с помощью разработанной системы контроля и диагностики. Данные экспериментов подтвердили теоретические положения и выводы диссертации.

12. Основные теоретические и прикладные результаты диссертации использованы при создании и эксплуатации системы контроля и диагностики состояния диэлектрических материалов и изделий в ВНИИЭИМ (г. Москва) в ХГПУ, внедрены в Ханойском технологическом университете (Вьетнам). Предполагается также реализация результатов данной работы в ГНПО "Метрология (г. Харьков), в лаборатории "Обработка изображения и речи" (г. Ханой), в совместной Украинско-Вьетнамской лаборатории (г. Ханой), на электроэнергетических предприятиях Вьетнама и др.

Основное содержание диссертации опубликовано в:

1. Чан Ки Фук К расчету распределения электрического поля в твердой высоковольтной изоляции, содержащей газы включения. Электричество № 12/1995, с. 60-65.

2. Чан Ки Фук Растекание зарядов, оседающих на поверхности газового включения в высоковольтном твердом диэлектрике. Электричество № 6/1994, с. 12-14.

3. Чан Ки Фук, К определению размера газового дефекта твердых диэлектриков по параметрам частичных разрядов. Укр. Метрол. Журнал.

№ 2/1996, с.14-16.

4. Tran Ky Phuc Influence of Charge Decay on Partial Discharge. /IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP, October 17-20, 1993 Pocono Manor, Pennsylvania, USA, 1993 №138.

5. Tran Ky Phuc Partial Discharge Simulation by Using Object-Oriented Programming. /IEEE IV-th Conference on Properties and Applications of dielectric materials ICPADM, July 3-8, 1994 Queensland, Brisbane, Australia, 1994, №311.

6. Чан Ки Фук, Себоко В.П. О восстановлении функции распределения газовых дефектов с помощью регрессионного анализа. Укр.Метрол.Журнал. №2/1996, с.25-27.

7. Чан Ки Фук Амплитудно-фазовые спектры импульсов частичных разрядов в высоковольтной твердой изоляции. Автореферат ...канд. тех. наук. Москва: МЭИ, 1992. 20 с.

8. Чан Ки Фук Математическая модель дефектов, вызывающих разрушение материалов и изделий. В сб.: "Высокие технологии: моделирование, оптимизация, диагностика.- INTERPARTNER". Труды международной научно-технической конференции, (Брауншвейг, Будапешт, Киев, Магдебург, Мишкольц, Москва, Харьков) Харьков-Алушта, 1996, с. 136.

9. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я., Чан Ки Фук, Измерение и интерпретация амплитудно- фазовых спектров импульсов частичных разрядов. В сб.: "Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной, силовой и полупроводниковой техники" Труды всесоюзной научно-технической конференции, Москва, 1989, с.32-33.

10. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Чан Ки Фук, Амплитудно-

фазовые спектры импульсов частичных разрядов. В сб.: "Повышение качества и улучшение технико-экономических показателей силовых конденсаторов и комплектных конденсаторных установок" Труды VI всесоюзного научно-технического совещания, Серпухов- 1991, с.59-60.

11.Чан Ки Фук, Набока Б.Г. Моделирование частичных разрядов в газовом включении с использованием объектно- ориентированного программирования. В сб.: "ДИЭЛЕКТРИКИ-93" Труды международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 1993, с.14-15.

12.Чан Ки Фук, Распределение электрического поля в твердой электрической изоляции, содержащей газополости. В сб.: "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" Труды международной научно-технической конференции, Харьков-Алушта, 1995, с. 197-198.

13.Чан Ки Фук, Себо В.П. Диагностика дефектов, вызывающих разрушение электрической изоляции. В сб.: "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" Труды международной научно-технической конференции, Харьков-Алушта, 1995, с. 193-194.

14.Чан Ки Фук, Амплитудно-фазовые спектры импульсов частичных разрядов в высоковольтной твердой изоляции. Диссертация. Харьков: ХПИ, 1992, 220с.

15.Чан Ки Фук, Себо В.П. Измерительно- информационная система диагностики материалов в процессе изготовления и эксплуатации. В сб.: "Высокие технологии: моделирование, оптимизация, диагностика.- INTERPARTNER". Труды международной научно-технической конференции, (Брауншвейг, Будапешт, Киев, Магдебург, Мишколец, Москва, Харьков) Харьков-Алушта, 1995, с. 137-138.

16. Чан Ки Фук, Идентификация дефектов, вызывающих разрушение электрической изоляции, с помощью факторного анализа характеристик частичных разрядов /Харьк. гос. политехн. ун-т. - Харьков, 1995. - 8 с.:ил.- Деп. в ГНТБ Украины 02.10.95 №2244-УК95.

17. Чан Ки Фук, Себко В.П. Эквивалентная схема замещения высоковольтного твердого диэлектрика, содержащего газовое включения. /Харьк. гос. политехн. ун-т. - Харьков, 1995. - 11 с.- Деп. в ГНТБ Украины 02.10.95, №2245-УК 95.

18. Чан Ки Фук, Численное решение задачи расчета электрического поля в высоковольтной твердой изоляции, содержащей газовые включения /Харьк. гос. политехн. ун-т. - Харьков, 1995. - 12 с.- Деп. в ГНТБ Украины 02.10.95, №2246-УК95.

19. Чан Ки Фук, Себко В.П. Идентификация дефектов, вызывающих разрушение электрической изоляции с помощью многослойного персептрона /Харьк. гос. политехн. ун-т. - Харьков, 1995. - 14 с.- Деп. в ГНТБ Украины 02.10.95, №2247-УК95.

20. Чан Ки Фук, Об установлении связи между кажущимся и истинным зарядами частичного разряда в газовых включениях высоковольтного твердого диэлектрика с помощью модели электрического диполя" /Харьк. гос. политехн. ун-т. - Харьков, 1995. - 10 с.- Деп. в ГНТБ Украины 02.10.95, №2248-УК95.

Анотація

Чан Ки Фук. Методи неруйнуючого контролю діелектричних матеріалів і виробів згідно з параметрами часткового розряду (теорія і розробка).

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13- прилади і методи контролю та захисту навколишнього середовища, речовин, матеріалів та виробів, Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1996.

В дисертації вирішена наукова проблема теоретичного

контролю діелектричних виробів на основі аналізу узагальнених математичних моделей чередування імпульсів часткового розряду (ЧР). Розроблені аналітичні та чисельні методи розрахунку квазістатичного електричного поля в системі, що вміщує тонкі заряджені шари на границях середовищ, у тому числі в комплексі "електроди- твердий діелектрик-газові дефекти". Запропоновані і теоретично обгрунтовані методи ідентифікації джерел ЧР з допомогою нейроподібної мережі з ансамблевою та багатощаровою структурою, факторного та регресивного аналізу. Реалізована інформаційно-вимірвальна система для контролю та діагностики стану ізоляції на базі персонального комп'ютера IBM PC AT.

Summary

Tran Ky Phuc. Methods of Non-Destructive Testing of Dielectric Materials and Articles by using Partial Discharge Parameters. (Theory and Design). The dissertation on competition for the academic degree of doctor in technological sciences on the speciality: 05.11.13 - Devices and Methods of the Control and Protection of the Environment, Substances, Materials and Articles. Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1996.

The scientific problem of theoretical substantiating and developing methods, devices for non-destructive control of solid dielectric based on generalized mathematical models of partial discharge pulse sequence was solved in the dissertation. The analytical and numerical methods aimed for calculation of quasistatic electric field in the system containing thin charged layer on medium boundaries, including the system "electrodes- solid dielectric- gaseous defects" were developed. The methods for automatic identification of PD-sources based on neural network with ensemble and multilayer structure, factor and regressive analysis were proposed and theoretically substantiated. PC-based information-measurement system for control and diagnosis of electrical insulation was constructed.

Ключевые слова: диэлектрик, частичный разряд, нейроподобная сеть, персептрон, газовый дефект, квазистатическое электрическое поле, прямой доступ к памяти, интерфейс, IBM PC AT.

Phuc

Подп. к печати 25.01.96. Формат 60x84/16. Бумага типограф.
Усл. печ. л. 2.0. Тираж 100. Зак. 12-10.

Редакционно-издательский отдел
Харьковский государственный политехнический университет
310002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21.

453020

AB 33.759