

На правах рукописи

Андреев Иван Александрович



**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ
ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО
СТАТИСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
доцент, **Амосов Владимир Владимирович**

Официальные оппоненты:

Ханин Самуил Давидович доктор
физико-математических наук, профессор Российского
государственного педагогического университета, профессор,
зав. кафедрой физической электроники

Голенко Олег Викторович кандидат
технических наук, начальник Ленинградского
производственного участка Филиал
ОАО «Электросетьсервис ЕНЭС» - Новгородская СПБ

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
дополнительного профессионального образования
Петербургский энергетический институт
повышения квалификации (ФГАОУ ДПО ПЭИпк)

Защита состоится « 19 » апреля 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. 284

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « 18 » марта 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.16
кандидат технических наук, доцент

Журавлева Наталия Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в Российской Федерации (РФ) оборудование большинства электростанций имеет срок службы свыше 30 лет и более. Поэтому остро стоит вопрос о техническом перевооружении станций на базе современного энергетического оборудования, в частности, генераторов с повышенными технико-экономическими показателями. Согласно основным положениям технической политики в электроэнергетике РФ на период до 2030 года, отечественная промышленность должна освоить выпуск новых видов генерирующего оборудования, в частности, турбогенераторов с полностью воздушным охлаждением до 350 МВт и осуществить разработку таких машин мощностью до 500 МВт. Актуальным является также и промышленное освоение турбогенераторов до 1500 МВт с водяным охлаждением для АЭС и оснащение теплоэлектростанций на 25-30 % асинхронизированными турбогенераторами. Причем техническое перевооружение действующих электростанций включает как замену, так и глубокую модернизацию оборудования. Совершенствование конструкций турбо- и гидрогенераторов тесно связано с возрастанием электродинамических, тепловых и термомеханических нагрузок, что требует решения ряда важных прикладных проблем, в том числе в области внедрения новых изоляционных материалов и разработки прогрессивных технологических процессов изготовления систем изоляции статорных обмоток, а также разработки и широкого внедрения современных систем диагностики их работоспособности.

Для высоковольтного электроэнергетического оборудования проблема контроля и технического диагностирования стоит особенно остро из-за большой ответственности выполняемых им функций. Успех ее решения во многом зависит от выбора контролируемых параметров, а также умения предсказать момент отказа на основании анализа критериев работоспособности путем использования интеллектуальных прогностических алгоритмов.

Хорошо известно, что работоспособность электрических машин высокого напряжения, в первую очередь, определяется надежностью систем изоляции статорной обмотки. Согласно статистическим исследованиям, проведенным в Северной Америке (США и Канаде), более 37% отказов генераторов и электродвигателей с воздушным охлаждением и до 56% отказов гидрогенераторов связаны с проблемами электрической изоляции статорных обмоток этих машин, которые, в первую очередь, обусловлены развитием в них частичных разрядов (ЧР) различных типов и интенсивности. ЧР в системах изоляции статорной обмотки электрических машин возникают под действием высокой напряженности электрического поля в местах пониженной электрической прочности. Они представляют собой либо пробой газовых включений внутри корпусной изоляции, либо местные электрические разряды в газе по поверхности твердого диэлектрика, и на этой основе разделяются на внутренние и внешние. Отказ системы электрической изоляции естественно происходит не мгновенно и, в первую очередь, определяется типом ЧР и областью их возникновения. Время от возникновения первичных ЧР до полного пробоя изоля-

ции в большинстве зафиксированных случаев составляет от нескольких недель до десятков лет, наиболее опасными типами ЧР являются некоторые внешние, в частности, пазовые разряды. Таким образом, характеристики и типы ЧР являются важными диагностическими признаками, что дает возможность обнаруживать технологические дефекты уже на стадии заводских приемо-сдаточных испытаний.

В отличие от других диагностических методов, основанных на измерениях электрических характеристик (диэлектрических потерь, абсорбционных характеристик и т.д.), регистрация характеристик ЧР может выявлять локальные дефектные области и идентифицировать наиболее опасные типы ЧР, что обуславливает преимущество этого метода. Необходимым условием для этого является разработка эффективного алгоритма и автоматизированной методики идентификации дефектов изоляции по характеристикам ЧР, которые могли бы быть использованы в заводских условиях для контрольных испытаний. Мероприятия по разработке подобных методов могут быть реализованы только на основе использования знаний в области электротехнических материалов, техники высоких напряжений и системного анализа. Кроме того, существенное влияние на разработку методов контроля оказывает эффективность разработанного программного обеспечения, возможность его технической реализации и доступность измерительных средств. Таким образом, тема данной работы, посвященной разработке методики идентификации дефектов изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин по характеристикам ЧР на этапе заводских испытаний, является актуальной.

Цель работы – разработать методику и автоматизированную систему для идентификации дефектов в изоляции статорных стержней и катушек, а также в собранных статорных обмотках высоковольтных электрических машин в процессе заводских приемо-сдаточных испытаний.

Для достижения этой цели в диссертации были поставлены и решены следующие **задачи**:

- создать модельные образцы с искусственными дефектами, являющимися источниками ЧР, характерных для изоляции высоковольтных электрических машин;
- экспериментально изучить влияние типов искусственных дефектов изоляции на характеристики ЧР;
- выбрать и рассчитать характеристические признаки амплитудно-фазовых спектров ЧР;
- разработать алгоритм идентификации дефектов на основе спектров ЧР;
- провести апробацию разработанной автоматизированной методики идентификации технологических дефектов при приемо-сдаточных испытаниях реальной продукции в заводских условиях.

Методы исследования - при решении поставленных в диссертационной работе задач использовались методы и способы исследования электротехнических материалов и изделий, циф-

ровой обработки сигналов, техники высоких напряжений, а также модельные и натурные эксперименты. При разработке вычислительной системы использовались следующие программные продукты: Microsoft .NET Framework, C#, Windows Forms, WCF, Microsoft SQL Server.

Научная новизна работы:

- разработана математическая модель, описывающая амплитудно-фазовые спектры ЧР различных типов;
- доказана эффективность использования статистических характеристик амплитудно-фазовых спектров ЧР для идентификации технологических дефектов в системе изоляции высоковольтных электрических машин на этапе приемо-сдаточных испытаний;
- повышена распознающая способность методики идентификации дефектов изоляции за счет дополнительного использования характеристических признаков, определяющих взаимное расположение спектров ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения;
- впервые разработана автоматизированная методика и программа идентификации дефектов систем изоляции электрических машин, основанная на дискриминантном анализе статистических характеристик спектров ЧР.

Практическая значимость: Доказана возможность применения разработанной методики идентификации дефектов по статистическим характеристикам ЧР в лаборатории с использованием обучающей выборки и в заводских условиях (ОАО «Силовые машины», завод «Электросила» в г. Санкт-Петербурге) при проведении приемо-сдаточных испытаний изоляции статорных стержней турбо- и гидрогенераторов и статорных обмоток в сборе ряда мощных турбогенераторов. Использование разработанного программного продукта позволило повысить качество выпускаемой продукции за счет более эффективной отбраковки некондиционной продукции, что подтверждено Актом внедрения результатов диссертации.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается сопоставлением полученных результатов с работами других авторов, с теоретическими расчетами и оценками; использованием современных методов исследования и стандартизованных методик измерений; изготовлением образцов в производственных условиях; значительным количеством образцов; проведением многочисленных повторных измерений, показывающих воспроизводимость результатов.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель, описывающая амплитудно-фазовые спектры ЧР, возникающих в системах изоляции высоковольтных электрических машин.

2. Алгоритм распознавания дефектов системы изоляции высоковольтных электрических машин на основе анализа амплитудно-фазовых спектров ЧР в процессе приемо-сдаточных испытаний.
3. Автоматизированный программный комплекс, реализующий модуль интеллектуальной системы обработки диагностической информации по характеристикам ЧР, и результаты анализа эффективности разработанных алгоритмов с использованием результатов натуральных испытаний.
5. Результаты исследования характеристик ЧР в модельных образцах изоляции с искусственными дефектами различных конфигураций, составляющих обучающую выборку.
6. Методика приемо-сдаточных испытаний систем изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин по характеристикам ЧР.

Личный вклад автора состоит в определении цели и методов исследования; разработке конструкции и изготовлении испытательных модельных образцов; проведении экспериментальных исследований; разработке методики идентификации дефектов, а также в программировании автоматизированного вычислительного комплекса для статистической обработки ЧР. Все результаты, представленные в работе, получены лично автором или при его непосредственном участии.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: V Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция - 2010» (Санкт-Петербург, 2010 г.), XII Международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики - 2011) (Санкт-Петербург, 2011 г.), VIII Международной научно-практической конференции «Электроизоляционные материалы и системы изоляции электрических машин» (Московская область, 2011 г.), XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2012 г.), III конференции Молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.) на постоянно действующем семинаре ФГАОУ ДПО ПЭИПК «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования» и других.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 1 – в изданиях перечня ВАК.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы, включающего 93 наименования, и приложения. Диссертация изложена на 159 страницах, содержит 8 таблиц и 120 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы по разработке автоматизированной методики идентификации технологических дефектов систем изоляции в процессе диагностирования изоляции статорной обмотки мощных электрических машин, формулируется цель работы и

задачи исследования, обсуждается новизна и практическая значимость выносимых на защиту результатов работы.

В первой главе представлен обзор отечественных и зарубежных работ, в которых отражены современные взгляды на закономерности возникновения и развития внутренних и внешних ЧР, а также характер их разрушающего воздействия на термореактивную слюдосодержащую изоляцию высоковольтных электрических машин. По результатам этого анализа выделены наиболее опасные типы ЧР. Охарактеризованы экспериментальные способы измерения характеристик

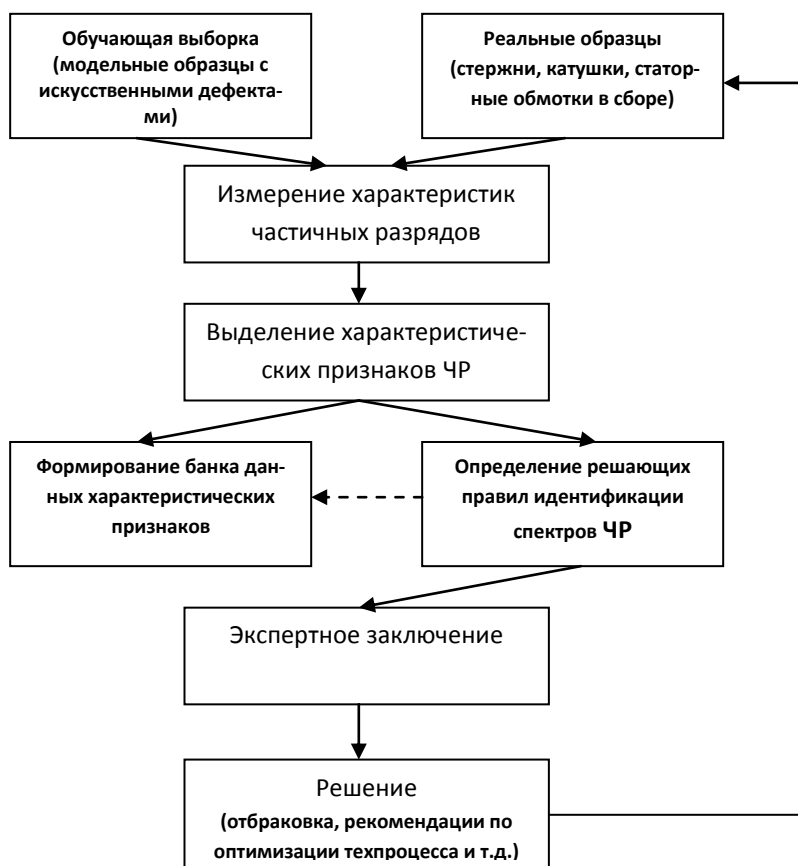


Рис.1. Алгоритм идентификации технологических дефектов в изоляции статорной обмотки электрических машин на стадии заводских приемо-сдаточных испытаний

Рис.1. Алгоритм идентификации технологических дефектов в изоляции высоковольтных электрических машин в заводских и эксплуатационных условиях. Проанализированы существующие в мировой практике способы идентификации дефектов изоляции по характеристикам ЧР, которые условно можно разбить на три группы:

- методики идентификации, основанные на экспертных оценках интегральных параметров и особенностей спектров ЧР;
- методики идентификации, основанные на анализе формы и закономерностей возникновения импульсов ЧР;
- методики идентификации, основанные на изучении статистических характеристик спектров ЧР.

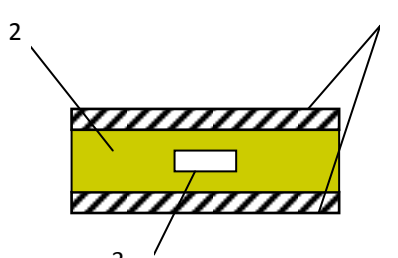
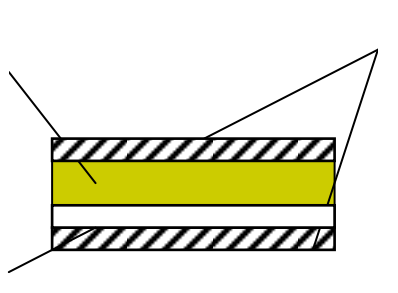
Определены достоинства и недостатки каждой методики идентификации дефектов изоляции. Показано, что среди математических моделей, используемых при решении задач диагностирования систем изоляции высоковольтных электрических машин, наиболее подходящими являются модели, включающие результаты натуральных испытаний с применением обучающей выборки. Отмечено, что идентификация и выявление дефектов изоляции не могут быть осуществлены только прямыми измерениями характеристик ЧР, для этого должны дополнительно использоваться специальные вычислительные программы, основанные на методах распознавания образов. В настоящее время таких программ, предназначенных для использования в заводских условиях, не существует. В связи с этим, основной целью работы являлась разработка методики идентификации наиболее опасных техно-

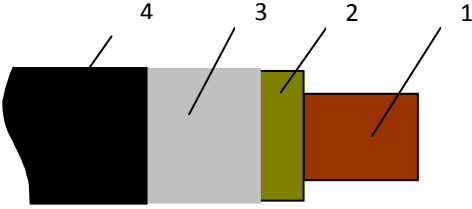
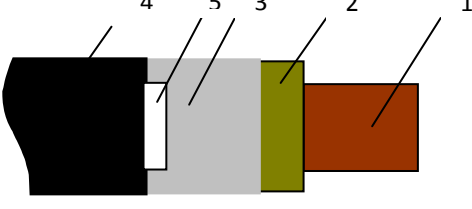
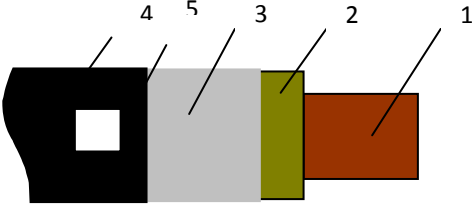
логических дефектов в изоляции статорной обмотки электрических машин на стадии заводских приемо-сдаточных испытаний.

Во второй главе описаны конструкции объектов исследования, методы проведения натурных экспериментов и разработанный алгоритм распознавания дефектов изоляции по статистическим характеристикам спектров ЧР. Алгоритм разработанной методики идентификации дефектов изоляции представлен на рис. 1. Он состоит из нескольких основных этапов, которые включают в себя разработку конструкции и изготовление модельных образцов, образующих обучающую выборку; регистрацию характеристик ЧР в виде амплитудно-фазовых спектров и выделение их характеристических признаков; формирование базы данных и, как итог, принятие экспертного решения. Практически значимым является то, что в разработанном алгоритме содержится обратная связь, позволяющая оперативно влиять на технологические процессы изготовления изоляции статорной обмотки с целью исключения причин возникновения выявленных дефектов. Обучающая выборка формировалась из серии модельных испытательных образцов, в которых, посредством создания в них искусственных дефектов различных типов и геометрических размеров (Таблица 1), реализовалась возможность возникновения внутренних или внешних ЧР, присущих реальной изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин. Изготовление корпусной изоляции модельных образцов производилось из электроизоляционных материалов (слюдосодержащая лента Элмикатерм 52409) и в соответствии с технологическим процессом (гидростатическая опрессовка), принятым на заводе «Электросила» г. Санкт-Петербург.

Конструкции образцов для моделирования ЧР

Таблица 1

Тип (характер ЧР)	Схема образца	Описание конструкции
<p>№1 (ЧР в газовой поре при двустороннем контакте с диэлектрическими поверхностями)</p>		<p>1 – проводящее покрытие ПЛГ 233; 2 – корпусная изоляция; 3 – цилиндрическое отверстие (диаметр – 1, 3, 6 мм, глубина – 0,6 мм).</p>
<p>№2 (ЧР в газовом отслоении между слоями изоляции и внутреннего проводящего покрытия)</p>		<p>1 – проводящее покрытие ПЛГ 233); 2 - корпусная изоляция; 3 – газовое отслоение толщиной 0,5 мм</p>

<p>№3 (коронные ЧР в краевой области проводящего покрытия)</p>		<p>1- медный стержень; 2 - корпусная изоляция; 3 - полупроводящее покрытие ПЛК 275; 4 - проводящее покрытие ПЛГ 233</p>
<p>№4 (поверхностные ЧР в дефекте полупроводящего лобового покрытия)</p>		<p>1- медный стержень; 2 - корпусная изоляция; 3 - полупроводящее покрытие ПЛК 275; 4 - проводящее покрытие ПЛГ 233; 5 - дефект (ширина – 2 мм, длина – 2,5,10 мм)</p>
<p>№5 (ЧР в дефекте проводящего пазового покрытия)</p>		<p>1- медный стержень; 2 - корпусная изоляция; 3 - полупроводящее покрытие ПЛК 275; 4 - проводящее покрытие ПЛГ 233; 5 – дефект покрытия (10X10) мм</p>

Таким образом, исследовались следующие типы внутренних ЧР (в газовом включении в корпусной изоляции; в газовом отслоении между слоями изоляции и внутреннего проводящего покрытия) и внешних ЧР (в краевой области проводящего покрытия; в дефекте полупроводящего лобового покрытия; в дефекте проводящего пазового покрытия). Особое внимание было уделено разработке и изготовлению модельного образца №3, в конструкции которого не предусматривалось создание каких-либо искусственных дефектов. В этом случае ЧР возникали в области края проводящего пазового покрытия, что соответствовало нормальным условиям, характерным для качественно изготовленной системы изоляции статорного стержня.

Характеристики ЧР регистрировались электрическим методом в соответствии с требованиями ГОСТ 20074-83 и МЭК 60270, с помощью цифрового измерительного комплекса «СКИТ» ЧР (производства СПбГПУ) посредством амплитудной и фазовой дискриминации импульсов ЧР. Испытания проводились на переменном напряжении (50 Гц) при комнатной температуре. На первом этапе испытаний определялась величина напряжения возникновения ЧР ($U_{нЧР}$) в режиме ступенчатого повышения испытательного напряжения ($U_{исп}$). Величина ступени составляла 500 В, длительность выдержки на каждой ступени – 10 мин. На каждой ступени регистрировались ЧР. Величина $U_{нЧР}$ определялась как:

$$U_{нЧР} = \frac{U_{i-1} + U_i}{2},$$

где U_i – величина ступени $U_{исп}$, на которой регистрируются ЧР с

стотой повторения выше 10 имп/с. Затем проводились измерения ЧР при $U_{исп}$ равных $1,1 \cdot U_{нЧР}$; $1,2 \cdot U_{нЧР}$; $1,3 \cdot U_{нЧР}$; $1,4 \cdot U_{нЧР}$, время регистрации составляло 200 периодов $U_{исп}$.

Амплитудно-фазовые спектры ЧР, регистрируемые измерительным комплексом «СКИТ» ЧР, представляли собой точечные $(n_{\text{ЧР}} - q_{\text{ЧР}} - \varphi)$ -распределения импульсов ЧР (где $n_{\text{ЧР}}$ – частота повторения ЧР, $q_{\text{ЧР}}$ – кажущийся заряд ЧР, φ – фаза появления ЧР). Такая форма спектра содержит полную информацию о характеристиках ЧР, однако, размерность $(n_{\text{ЧР}} - q_{\text{ЧР}} - \varphi)$ -распределения высока, что снижает эффективность распознавания типов дефектов изоляции. Поэтому проводилось снижение размерности амплитудно-фазового спектра ЧР путем его преобразования в двумерные $(q_{\text{ЧР}_{\text{макс}}} - \varphi)$; $(q_{\text{ЧР}_{\text{ср}}} - \varphi)$; $(n_{\text{ЧР}} - \varphi)$ – распределения за счет разбиения

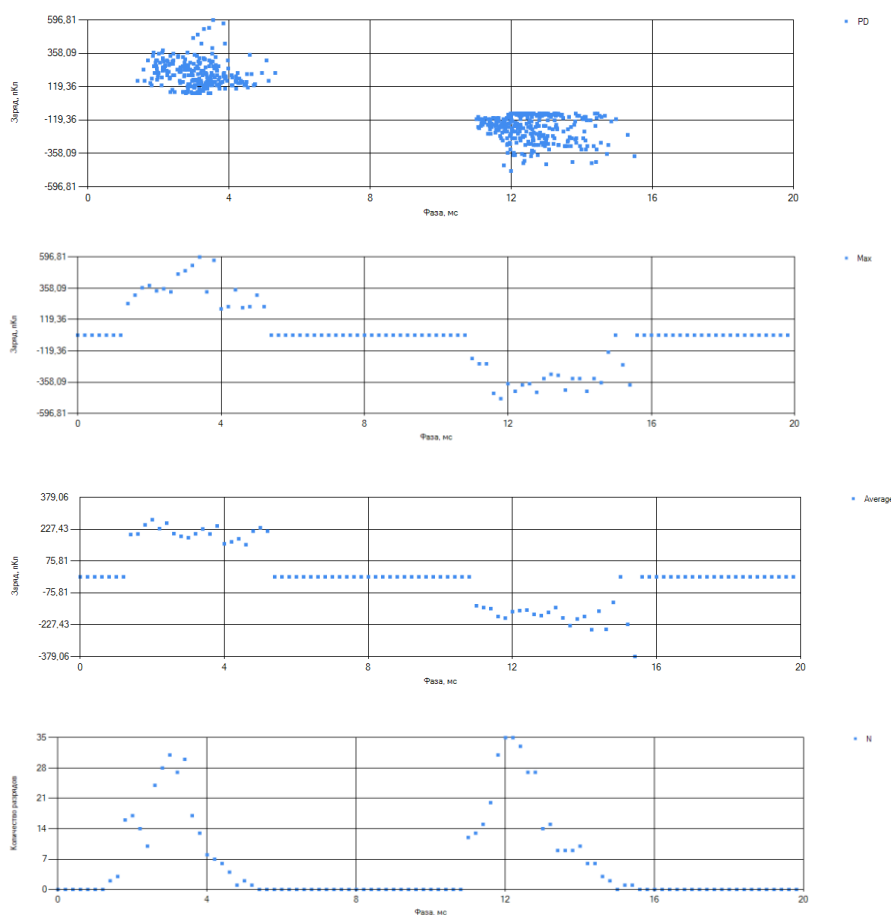


Рис. 2. Гистограммы зарегистрированного $(n_{\text{ЧР}} - q_{\text{ЧР}} - \varphi)$ - распределения импульсов ЧР (а) и преобразованных $(q_{\text{ЧР}_{\text{макс}}} - \varphi)$ (б); $(q_{\text{ЧР}_{\text{ср}}} - \varphi)$ (в) и $(n_{\text{ЧР}} - \varphi)$ (г) – распределений

идентификации учитывалось, что ранее выбор признаков производился на основе прошлого опыта, интуиции или простого предложения, что существенно снижало качество распознавания. При разработке программы идентификации дефектов кроме характеристических признаков (от 1-го до 4-го центральных моментов $(q_{\text{ЧР}_{\text{макс}}} - \varphi)$; $(q_{\text{ЧР}_{\text{ср}}} - \varphi)$; $(n_{\text{ЧР}} - \varphi)$ -распределений) использовались также признаки, определяющие взаимное расположение импульсов ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения, такие как коэффициенты корреляции $(CC_{\text{ср}}; CC_{\text{макс}}; CC_{\text{N}})$ и асимметрии по частоте повторения импульсов ЧР разной полярности (Q) и по фазам возникновения импульсов ЧР (Φ ; $\Phi_{\text{ср}}$; $\Phi_{\text{макс}}$):

временной оси на определенное количество интервалов, в которых рассчитывались соответствующие параметры ЧР ($q_{\text{ЧР}_{\text{макс}}}$ - максимальный кажущийся заряд; $q_{\text{ЧР}_{\text{ср}}}$ - средний кажущийся заряд; $n_{\text{ЧР}}$ - частота повторения) (рис. 2). Следующий этап – расчет и извлечение различительных характеристических признаков преобразованных спектров ЧР. При этом размерность признакового пространства минимизировалась, в результате чего сокращалось количество требуемых измерений и улучшалась статистическая устойчивость результатов распознавания. При разработке методики иденти-

$$CC_{q_{cp}} = \frac{\sum(q_{cp}^+ - \bar{q}_{cp}^+)(q_{cp}^- - \bar{q}_{cp}^-)}{\sqrt{(q_{cp}^+ - \bar{q}_{cp}^+)^2 (q_{cp}^- - \bar{q}_{cp}^-)^2}}$$

$$CC_{q_{max}} = \frac{\sum(q_{max}^+ - \bar{q}_{max}^+)(q_{max}^- - \bar{q}_{max}^-)}{\sqrt{(q_{max}^+ - \bar{q}_{max}^+)^2 (q_{max}^- - \bar{q}_{max}^-)^2}}$$

$$CC_N = \frac{\sum(N^+ - \bar{N}^+)(N^- - \bar{N}^-)}{\sqrt{(N^+ - \bar{N}^+)^2 (N^- - \bar{N}^-)^2}}$$

$$\rho = \frac{\sum q_i^- / \sum N_i^-}{\sum q_i^+ / \sum N_i^+}$$

$$\Phi = \frac{(\varphi_{max}^- - \varphi_{min}^-) - (\varphi_{max}^+ - \varphi_{min}^+)}{\tau}$$

$$\Phi_{cp} = \frac{\varphi_{cp}^-}{\tau} - \frac{\varphi_{cp}^+}{\tau}$$

$$\Phi_{max} = \frac{\varphi_{max}^-}{\tau} - \frac{\varphi_{max}^+}{\tau}$$



Рис. 3. Структура аппаратно-программного комплекса идентификации дефектов системы изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин по статистическим характеристикам ЧР

где q_{cp} , q_{max} – средний и максимальный кажущийся заряд; N – частота повторения; φ_{cp} , φ_{max} , φ_{min} – фазы возникновения импульсов ЧР, соответствующих максимальному, среднему и минимальному зарядам спектра ЧР; индексы $^+$ и $^-$ соответствуют характеристикам ЧР на положительном и отрицательном полупериодах, соответственно, τ – продолжительность полупериода $U_{исп}$. Значения характеристических признаков спектров ЧР в моделях, составляющих обучающую выборку, формируют базу данных, которая использовалась для установления канонических дискриминантных функций при определении границ кластеров для каждого типа изучаемых ЧР. Выделение кластеров различных источников ЧР проводилось методом дискриминантного анализа путем нахождения такой линейной комбинации переменных, которая оптимально разделяет рассматриваемые модели:

$$d_{km} = \beta_0 + \beta_1 * x_{1km} + \dots + \beta_p * x_{pkm} \quad ,$$

где d_{km} – значение канонической дискриминантной функции для m -го объекта в группе k ($m = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, g$); x_{pkm} – значение дискриминантной переменной X_i для m -го объекта в группе k ; β_0, \dots, β_p – коэффициенты дискриминантной функции.

Для практической реализации методики идентификации дефектов изоляции по характеристикам ЧР была разработана автоматизированная система, реализующая алгоритм, представленный на рис. 1. Структура аппаратно-программного комплекса по идентификации дефектов изоляции приведена на рис. 3. Ком-

плекс состоит из клиентской и серверной частей, которые связываются при помощи специального сервиса, позволяющего клиентской программе получать актуальные параметры системы, вычисляемые серверной частью в ходе обучения. Сервис позволяет отправлять на сервер экспертное заключение о качестве проведенной идентификации дефекта, что позволяет произвести дополнительное обучение системы и, тем самым, повысить качество распознавания. Серверная часть системы включает в себя три основных элемента:

- базу данных, хранящую обработанную информацию о спектрах ЧР в модельных образцах;
- модуль обработки данных, реализующий библиотеку математических методов для обработки спектров ЧР;
- модуль обучения, который реализует алгоритмы кластерного и дискриминантного анализов.

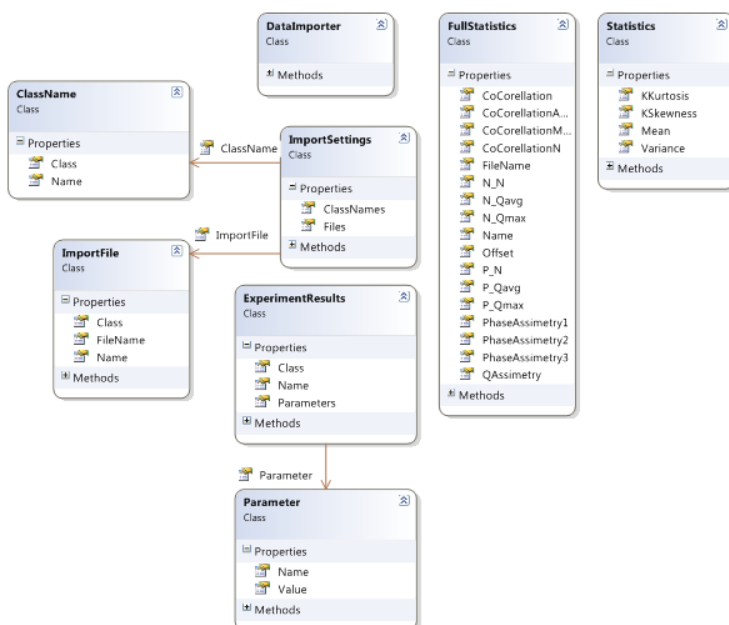


Рис. 4. Структура классов, описывающих основные модели данных по ЧР

Структура классов, описывающих основные модели данных, приведена на рис. 4.

В третьей главе представлены основные экспериментальные результаты, их анализ и основанные на полученных данных заключения. Характеристики ЧР, возникающих в модельных образцах с искусственными дефектами, измерялись при испытательном напряжении промышленной частоты (50 Гц). Определялось значение напряжения возникновения ЧР ($U_{нчр}$), после чего регистрировались амплитудно-фазовые спектры ЧР при значениях $U_{исп}$, превышающих величину $U_{нчр}$. Затем с использованием разработанного программного обеспечения рассчитывались интегральные характеристики (максимальный кажущийся заряд $q_{максчр}$ и средний ток $I_{чр}$), а также характеристические признаки спектров ЧР отдельно на положительном и отрицательном полупериодах $U_{исп}$.

Клиентская часть программы поддерживает пакетный режим обработки данных о спектрах ЧР и позволяет загружать и сохранять файлы, описывающие пакеты данных (соответствия спектров ЧР определенному кластеру), для чего разработан удобный интерфейс описания кластеров, позволяющий работать с двумерными и трехмерными формами представления информации. Для обмена данными между модулями программы используются XML файлы, в которые сериализуются данные с описанием спек-

Было установлено, что для исследованных типов внутренних и внешних ЧР, за исключением коронных ЧР на краю пазового проводящего покрытия (образец № 3), наблюдается увеличение интегральных характеристик с ростом $U_{исп}$. Минимальные значения интегральных характеристик ($q_{максЧР}$, $I_{чр}$) во всем диапазоне испытательных напряжений наблюдались для ЧР, возникающих в образце № 3. Амплитудно-фазовые спектры внутренних ЧР на отрицательном и положительном полупериодах $U_{исп}$ характеризуются симметрией, а амплитудно-фазовые спектры внешних ЧР - выраженной асимметрией с преимущественным расположением импульсов на отрицательном полупериоде. В отличие от интегральных характеристик, статистические параметры их спектров и коэффициенты, определяющие корреляцию и асимметрию положительных и отрицательных спектров ЧР, для всех исследованных типов внутренних и внешних ЧР практически не изменяются при увеличении $U_{исп}$ или стабилизируются при $1,2 \cdot U_{нчр}$. Поэтому все представленные ниже данные по значениям характеристических признаков были получены для спектров ЧР, измеренных при испытательном напряжении равном $1,2 \cdot U_{нчр}$.

Для выделения классов ЧР для объектов исследования (дефектов) использовались две математические модели. В первой модели для расчета использовались характеристические признаки, определяющие особенности формы ($q_{чрмакс} - \varphi$); ($q_{чрср} - \varphi$); ($n_{чр} - \varphi$) – спектров ЧР для всех типов исследованных модельных образцов. К таким признакам относятся центральные моменты соответствующих распределений (среднее арифметическое, дисперсия, а также коэффициенты асимметрии и эксцесса), широко применяющиеся в существующих в настоящее время методиках идентификации дефектов изоляции.

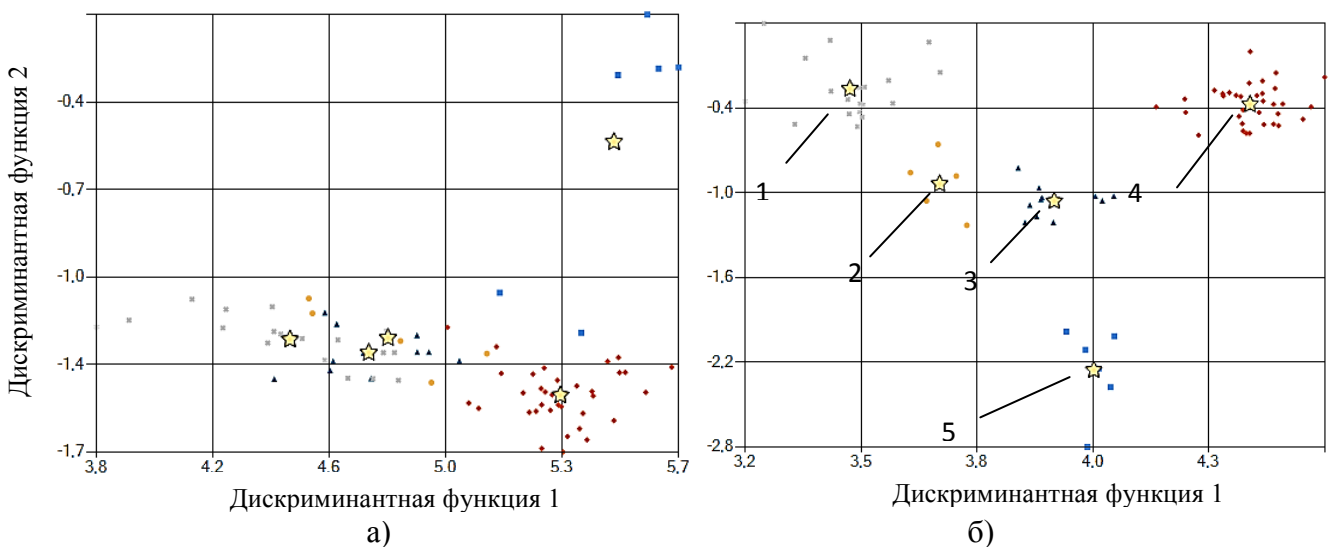


Рис. 5. Диаграммы рассеяния канонических значений для пар наиболее значимых дискриминантных функций, рассчитанных с использованием только центральных моментов (а) и всех характеристических признаков спектров ЧР (б), для каждого из исследованных модельных образцов: 1 – «пора в изоляции»; 2 – «дефект пазового покрытия»; 3 – «отслоение в изоляции»; 4 – «дефект полупроводящего лобового покрытия»; 5 – «нормальные условия»

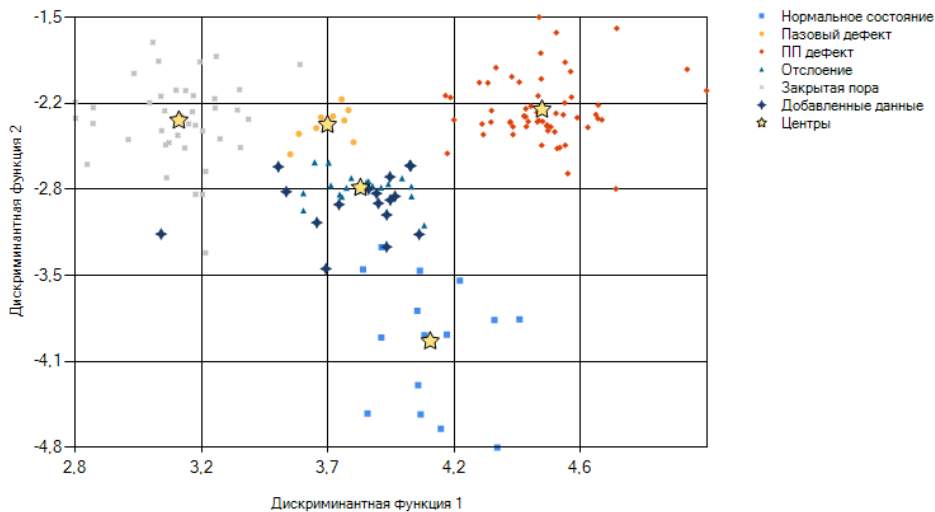
Во второй модели дополнительно использовались характеристические признаки (коэффициенты корреляции и асимметрии), определяющие взаимное расположение спектров ЧР на положительном и отрицательном полупериодах $U_{исп}$. На рис. 5 приведены диаграммы рассеяния канонических значений для пар наиболее значимых дискриминантных функций, рассчитанных по двум исследуемым математическим моделям, для каждого из исследованных типов ЧР. Как следует из представленных диаграмм, лучшее качество разделения изучаемых объектов получено для второй математической модели. На диаграмме (рис. 5 б) фиксируются пять четко обозначенных областей (кластеров), каждая из которых характеризует один из изучаемых типов ЧР, возникающих в одном из исследуемых модельных образцов с тем или иным искусственным дефектом. Качество разделения определялось расчетными значениями квадратов расстояния Махаланобиса между центроидами выделенных кластеров, которые для второй математической модели существенно превышают аналогичные показатели, характерные для первой модели. Следовательно, вторая математическая модель обеспечивает более высокую эффективность распознавания дефектов системы изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин.

Оценка работоспособности разработанной методики идентификации дефектов по статистическим характеристикам ЧР проводилась по методике проверки распознающей системы с «учителем» путем использования испытательных образцов со специально изготовленными искусственными дефектами различных типов и размеров (проверочная выборка), а также с использованием реальных образцов изоляции статорной обмотки (стержней и катушек), характеризующихся наличием в изоляции технологических дефектов, и по этой причине не прошедших приемо-сдаточные заводские испытания. Тип и геометрические размеры дефектов (источников ЧР) в проверочной выборке были известны только проверяющему персоналу, оператор этой информацией не владел, тем самым выполнялось условие объективности проверки и проведения испытаний по идентификации дефектов с помощью разработанной методики. В каждом из этих, случайно выбранных, образцов измерялись характеристики ЧР при значениях испытательного напряжения равных $1,2 \cdot U_{нчр}$, после чего результаты измерений обрабатывались с использованием разработанной автоматизированной методики идентификации дефектов. Полученные результаты сравнивались с типом дефекта, заложенного в конструкцию проверочного образца, после чего определялись погрешности идентификации.

На рис. 6 представлены (точками «Добавленные данные») результаты идентификации, полученные при испытаниях проверочных образцов, в которых были созданы искусственные дефекты в виде протяженных отслоений (различной толщины) внутренних слоев изоляции от проводника стержня. Как следует из представленных результатов, для исследованных проверочных образцов наблюдается высокое качество идентификации, из 16 опытов в 14-ти наблюдалось 100% совпадение с соответствующим классом дефекта («Отслоение»), и только в 2 случаях

идентификации наблюдается несовпадение, причем в одном из случаев наблюдается отнесение дефекта к похожему классу дефекта («Пора в изоляции»). При увеличении толщины отслоения в модельных образцах наблюдается незначительное снижение точности идентификации - из 20 опытов в 16-ти наблюдалось совпадение. Для других типов искусственных дефектов (поры в изоляции, нарушения пазового и лобового покрытий) в проверочных модельных образцах также наблюдалось достаточно высокая точность идентификации.

В таблице 2 приведены сводные данные по точности распознавания дефектов изоляции,



полученные при испытании проверочных модельных образцов различных типов, с использованием двух рассматриваемых математических моделей. Можно видеть, что точность идентификации дефектов изоляции при использовании математической модели, в которой учитываются параметры, определяющие взаимное расположение спектров

Рис. 6. Результаты идентификации («Добавленные данные»), полученные при испытании проверочного образца с искусственным дефектом в виде отслоения (толщиной 0,4 мм)

ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения более, чем на 20 % выше, чем в сравниваемой модели.

Точность распознавания дефектов изоляции

Таблица 2

Математическая модель	Размер проверочной выборки, шт.	Количество верно определенных данных, шт.	Доля правильно определенных типов дефектов, %
1	142	92	64
2	142	123	87

Практически важным являлась оценка работоспособности разработанной методики идентификации дефектов, проведенная с использованием в качестве объектов испытания образцов реальной изоляции статорных стержней. Исследование ЧР, возникающих в таких образцах, проводилось на этапе приемо-сдаточных испытаний в заводских условиях. Целью испытаний в этом случае наряду с оценкой качества изготовленной изоляции являлось определение с использова-

нием разработанной программы типов технологических дефектов с последующим их исправлением путем оптимизации технологических режимов на стадии изготовления изделий. Кроме того, эти испытания подтвердили работоспособность разработанной автоматической методики распознавания дефектов в производственных условиях.

Особый интерес представляли испытания по регистрации ЧР, возникающих в изоляции отбракованных статорных стержней гидрогенератора типа СВ 484/110. Изоляция этих стержней характеризуется высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь изоляции (критерий отбраковки - $\Delta \text{tg}\delta > 0,5\%$). На рис. 7 приведены амплитудно-фазовые спектры ЧР, возникающих

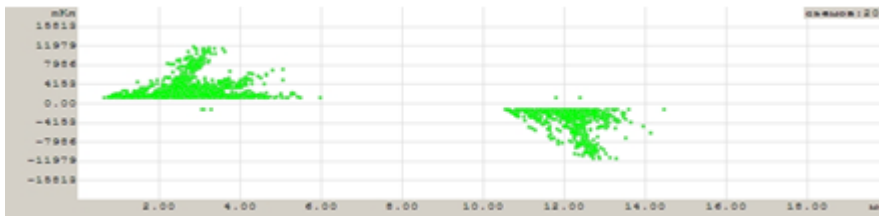


Рис. 7. Амплитудно-фазовый спектр ЧР в изоляции стержня гидрогенератора СВ 484/110 с повышенными значениями диэлектрических потерь ($\Delta \text{tg}\delta = 1,2\%$) при 4,5 кВ

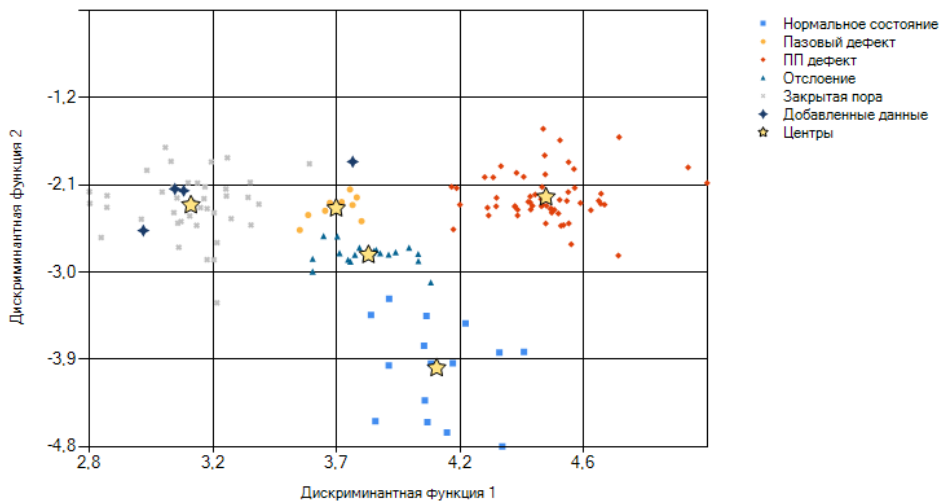


Рис. 8. Результаты идентификации дефектов в изоляции стержня гидрогенератора типа СВ 484/110 с повышенными значениями диэлектрических потерь

в изоляции забракованного стержня. Как видно, величина $q_{\text{ЧРмакс}}$ зарегистрированных ЧР высока (более 10000 пКл), что также свидетельствует о наличии технологических дефектов в изоляции. На рис. 8 представлены результаты дискриминантного анализа, где точками («Добавленные данные») отмечены спектры ЧР, зафиксированные в изоляции исследуемого стержня. Эти точки наиболее близко располагаются к центру кластера «Пора в изоляции». Следовательно, можно с высокой вероятностью предположить, что дефект изоляции представляет собой нарушение сплошности корпусной изоляции. При препарировании изоляции дефектных стержней были обнаружены протяженные отслоения на межфазной границе «внутренний проводящий слой – корпусная изоляция». Оптимизация технологического процесса (ужесточение контроля процесса намотки слюдосодержащих лент) и замена материала внутреннего проводящего слоя (вместо ленты ЛПП-400 использовалась лента ЛСП 100/500) привела к снижению интенсивности ЧР

(величина $q_{\text{ЧР}_{\text{макс}}}$ снизилась до 3000 пКл), уменьшились также и диэлектрические потери. Результаты проведенного дискриминантного анализа спектров ЧР подтвердили отсутствие каких-либо технологических дефектов в такой изоляции.

Апробация разработанной программы идентификации дефектов изоляции проводилась также при сдаточных испытаниях изоляции собранных статорных обмоток мощных турбогенераторов различных типов (ТЗФП-220, ТФП-110 и других), изготовленных методом полной вакуум-нагнетательной пропитки. При этих испытаниях ЧР регистрировались индивидуально в изоляции каждой фазы статорной обмотки, при этом две другие фазы заземлялись. Испытания проводились при различных значениях испытательного напряжения, максимальная величина соответствовала рабочему напряжению электрической машины. Результаты этих испытаний не выявили каких-либо существенных недостатков систем изоляции статорных обмоток, тем не менее, применение разработанной методики идентификации дефектов изоляции при приемосдаточных испытаниях исследованных типов турбогенераторов позволило выявлять изделия, проблемные с точки зрения возможного зарождения износовых дефектов в системах изоляции статорных обмоток. Поэтому такая информация о состоянии изоляции фаз статорной обмотки является важной, поскольку формирует стратегию диагностики в эксплуатации, с учетом данных по ЧР, полученных при заводских испытаниях.

Основные результаты и выводы:

1. Проведен научно-обоснованный выбор и разработана конструкция модельных образцов с искусственными дефектами для изучения наиболее распространенных типов ЧР, присущих системам изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин. С целью максимального приближения к реальным условиям эксплуатации изоляции электрических машин, используемые материалы и технология изготовления модельных образцов соответствовали заводским.
2. С помощью разработанных модельных образцов, экспериментально исследованы закономерности возникновения и развития внутренних и внешних ЧР в системах изоляции электрических машин, а также статистические особенности их амплитудно-фазовых спектров. Методами линейного дискриминантного анализа проведена кластеризация исследованных типов ЧР, в результате чего на диаграмме рассеяния для пар наиболее значимых дискриминантных функций выделено пять областей, соответствующих ЧР, возникающих в исследованных дефектах изоляции.
3. Разработан автоматизированный программный комплекс, реализующий модуль интеллектуальной системы обработки диагностической информации по характеристикам ЧР, и методика идентификации дефектов систем изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин, основанная на измерении статистических характеристик ЧР, их сохранении и обработ-

ке, заключающейся в выделении и расчете характеристических признаков и, как итог, отнесении неизвестного источника ЧР к определенному классу дефектов.

4. Апробация автоматизированного измерительного комплекса в процессе заводских приемно-сдаточных испытаний изоляции элементов статорной обмотки (стержней, катушек) и статорной обмотки в составе собранных мощных электрических машин различных типов продемонстрировала эффективность разработанной методики идентификации дефектов систем изоляции высоковольтных электрических машин.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Андреев, И.А. Оценка состояния системы изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин по результатам измерения статистических характеристик частичных разрядов / И.А.Андреев, В.В.Амосов, Ю.З.Ляховский//Электротехника. - №3.- 2011.- С.12-16 (из списка публикаций ВАК).

2. Андреев, И.А. Исследование модифицированных методов обучения нейронных систем/И.А.Андреев, Т.А.Вишневская//Материалы межвузовского конкурса-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада.- Санкт-Петербург. – 2007.- С.79.

3. Андреев, И.А. Программный комплекс для исследования мультиагентных систем/И.А.Андреев, Т.А.Вишневская//Материалы межвузовского конкурса-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада.- Санкт-Петербург. – 2010.- С.67.

4. Андреев, И.А. Разработка алгоритма идентификации дефектов в системе изоляции вращающихся электрических машин по параметрам частичных разрядов/ И.А.Андреев// Сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция - 2010», СПбГПУ, 1 июня – 4 июня 2010 г. Санкт-Петербург. – СПб. - С.220-221.

5. Андреев, И.А. Диагностические испытания систем изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин методом измерения частичных разрядов/И.А.Андреев, А.Е.Монастырский, Ю.З.Ляховский//Сборник «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования». – Санкт-Петербург: Издательство ПЭИПК. – 2011.- 34.- С.45-52.

6. Андреев, И.А. Идентификация типов дефектов изоляции по характеристикам частичных разрядов/И.А.Андреев, В.И.Млынчик// Физика диэлектриков (Диэлектрики - 2011): Материалы XII Международной конференции, Санкт-Петербург, 23-26 мая 2011 г. Т.2. – СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. - 2011. - С. 292.

7. Андреев, И.А. Разработка методики распознавания дефектов в системах изоляции высоковольтных электрических машин/ И.А.Андреев, В.В.Амосов//Труды XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии», ТПУ, Томск.09-13 апреля 2012 г. – С.11-12.