



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Развитие мировой энергетики требует постоянного ввода новых мощностей генерирующего электрооборудования. В настоящее время в России доля оборудования теплоэлектростанций со сроком службы свыше 30 лет составила примерно 68,4 % [1]. Поэтому остро стоит вопрос о техническом перевооружении станций на базе современного энергетического оборудования, в частности генераторов с повышенными технико-экономическими показателями.

Совершенствование конструкций генераторов 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 широко внедрения современных систем мониторинга и диагностики их работоспособности.

Как известно, работоспособность электрических машин высокого напряжения в первую очередь определяется надежностью систем изоляции статорной обмотки. Согласно статистическим исследованиям, проведенным в Северной Америке (США и Канада) [2], более 37 % отказов генераторов и электродвигателей с воздушным охлаждением и до 56 % отказов гидрогенераторов связаны с проблемами электрической изоляции статоров этих машин, которые большей частью обусловлены развитием в них частичных разрядов (ЧР) различных типов и интенсивности. ЧР возникают под действием высокой напряженности электрического поля в местах пониженной электрической прочности. Они представляют собой либо пробои газовых включений внутри изоляции, либо местные электрические разряды в газе по поверхности твердого диэлектрика. Отказ системы электрической изоляции по причине возникновения ЧР,

естественно, происходит не мгновенно. Период от возникновения первичных ЧР до полного пробоя изоляции в большинстве зафиксированных случаев составляет от нескольких недель до десятков лет. Таким образом, характеристики ЧР, а также динамика их изменения во время эксплуатации — важные диагностические признаки, дающие возможность обнаруживать дефекты на ранней стадии их развития, осуществлять отбраковку дефектных изделий в заводских условиях, а также планировать оптимальное финансирование ремонтных работ.

Идентификация и выявление дефектов изоляции не могут быть осуществлены прямыми измерениями и анализом интегральных характеристик ЧР; для этого должны использоваться специальные вычислительные программы, основанные на методах распознавания образов. В настоящее время нет таких программ, апробированных для использования в заводских условиях. В связи с этим основной целью нашей работы была разработка методики оценки качества изготовления электрической изоляции и программы идентификации наиболее опасных дефектов в статорной обмотке электрических машин на стадии приемо-сдаточных испытаний.

Как известно [3], в зависимости от физических причин и областей возникновения ЧР в системах изоляции электрических машин подразделяются на два типа. Внутренние ЧР возникают в областях с пониженной электрической прочностью, так называемых «включениях», локально расположенных в объеме корпусной изоляции. Это могут быть поры и протяженные полости, заполненные газом, инородные металлические и неметаллические включения (пыль, загрязнения, металлические стружки), острия на внутренних полупроводящих и проводящих экранах. Внутренние ЧР представляют существенную опасность для электрической изоляции, выполненной на основе термопластичных

органических диэлектриков (кабели с полимерной изоляцией, трансформаторы, конденсаторы с твердым органическим диэлектриком и др.). Однако термореактивная слюдосодержащая изоляция высоковольтных электрических машин может нормально функционировать в течение всего срока службы при наличии достаточно интенсивных внутренних ЧР. Внешние ЧР, как и внутренние, возникают в местах локального усиления электрического поля, однако не внутри корпусной изоляции электрической машины, а вне ее — в пазовой и лобовой зонах крепления обмотки.

Деструктирующее действие двух типов ЧР различно в связи с тем, что внешние ЧР в системе изоляции высоковольтных электрических

машин характеризуются более высокой интенсивностью. Кажущийся заряд внешних ЧР может достигать значений 10^5 пКл, а внутренних — существенно ниже (10^2 – 10^3 пКл). Таким образом, внешние ЧР приводят к серьезной деградации изоляции обмотки, особенно в лобовых областях. Поэтому определение типа и характера ЧР в системе изоляции имеет важное практическое значение, поскольку распознавание дефектов, их исключение на стадии приемки, возможность корректировки технологического цикла повышают качество и надежность электрической машины.

Блок-схема разработанной распознающей системы приведена на рис. 1. Принцип работы системы основан на использовании обучающей



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

выборки, достаточно полно представляющей генеральную совокупность (гипотетическое множество всех возможных объектов, характеризующих каждый тип дефектов изоляции). Обучающая выборка формировалась из оптимального набора модельных образцов (см. таблицу), в каждом из которых создавался единичный искусственный дефект, где реализовывалась возможность возникновения ЧР определенной разновидности. При изготовлении моделей использовались изоляционные материалы (предварительно пропитанная слюдопластовая лента Элмикатерм 52409) и технологические процес-

сы, традиционно применяемые для изготовления электрической изоляции статорных обмоток на заводе «Электросила» в г. Санкт-Петербурге. На рис. 2 приведена фотография модельного образца для изучения характеристик ЧР. Основным элементом являлся отрезок 1 реального стержня статорной обмотки с толщиной корпусной изоляции 3,4 мм. В качестве одного из электродов использовался проводник стержня, набранный из индивидуальных изолированных прямоугольных проводов. Для выравнивания электрического поля на поверхности проводника был нанесен слой тканного проводящего

Конструкции образцов для моделирования ЧР

Тип образца (характер ЧР)	Схема образца	Описание конструкции
№ 1 (ЧР в газовом включении при двустороннем контакте с диэлектрическими поверхностями)		1 — электроды (проводящий лак ПЛГ 233); 2 — корпусная изоляция; 3 — цилиндрическое отверстие (диаметр — 1, 3, 6 мм, глубина — 0,6 мм)
№ 2 (ЧР в газовом «расслоении» между слоями изоляции и внутреннего проводящего покрытия)		1 — электроды (проводящий лак ПЛГ 233); 2 — корпусная изоляция; 3 — газовое расслоение толщиной 0,5 мм
№ 3 (коронные ЧР в краевой области проводящего покрытия)		1 — медный стержень; 2 — корпусная изоляция; 3 — полупроводящее покрытие ПЛК 275; 4 — проводящее покрытие ПЛГ 233
№ 4 (поверхностные ЧР в дефекте полупроводящего покрытия)		1 — медный стержень; 2 — корпусная изоляция; 3 — полупроводящее покрытие ПЛК 275; 4 — проводящее покрытие ПЛГ 233
№ 5 (ЧР в дефекте проводящего пазового покрытия)		1 — медный стержень; 2 — корпусная изоляция; 3 — полупроводящее покрытие ПЛК 275; 4 — проводящее покрытие ПЛГ 233; 5 — дефект покрытия (10×10) мм

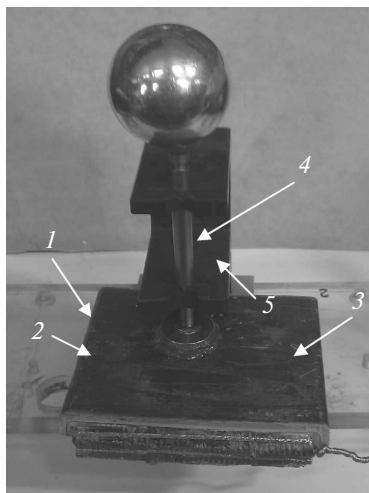


Рис. 2. Фотография модельного образца для изучения развития ЧР в искусственных дефектах

материала. Высоковольтный электрод представлял собой латунный цилиндр диаметром 30 мм. Для предотвращения коронных разрядов, мешающих измерению характеристик ЧР, развивающихся в искусственном дефекте, края электрода были закруглены (радиус закругления 4 мм), а краевая область между электродом и поверхностью образца заполнялась кремнийорганическим компаундом.

Использовались также макеты изоляции толщиной 2 мм, которые изготавливались на основе медных шин (800×30×6 мм). Конструктивно макеты представляли собой уменьшенные копии реальных статорных стержней.

На втором этапе измерялись характеристики ЧР (рис. 3) в соответствии с [4, 5] при помощи

цифрового измерительного комплекса «СКИТ ЧР» производства СПбГПУ путем амплитудной и фазовой дискриминации импульсов отдельно на положительных и отрицательных полупериодах испытательного напряжения. Эксперименты проводились с использованием источника высокого напряжения (ИВН), позволяющего плавно регулировать подаваемое на образец напряжение от 0 до 100 кВ; его конструкция обеспечивала отсутствие помех при измерении ЧР с уровнем кажущегося заряда $q_{\text{ЧР}}$ выше 10 пКл. Дальнейшее снижение уровня помех нецелесообразно, так как развитие дефектов во всех модельных образцах наблюдалось при значениях $q_{\text{ЧРmax}}$ как минимум на порядок выше. Токоведущие элементы установки имели форму, препятствующую появлению коронных разрядов, мешающих проведению эксперимента. Характеристики ЧР в модельных образцах измерялись при испытательном напряжении $1,2 U_{\text{нЧР}}$ и комнатной температуре.

Амплитудно-фазовые спектры ЧР, регистрируемые измерительным комплексом, представляли собой точечные распределения импульсов ЧР ($n_{\text{ЧР}} - q_{\text{ЧР}} - \varphi$). Информация представлялась в следующих координатах: ось Y — величина $q_{\text{ЧР}}$ кажущегося заряда ЧР; ось X — фаза φ возникновения ЧР. Каждый импульс ЧР фиксировался в виде точки ($q_{\text{ЧР}}; \varphi$) и информация, определяющая частоту повторения ЧР $n_{\text{ЧР}}$, накапливалась в течение времени измерения. Такая форма спектра содержит полную информацию о характеристиках ЧР. Однако размерность ($n_{\text{ЧР}} - q_{\text{ЧР}} - \varphi$)-спектра — высока, что снижает эффективность распознавания. Поэтому проводилось снижение этой размерности путем преобразования в двух-

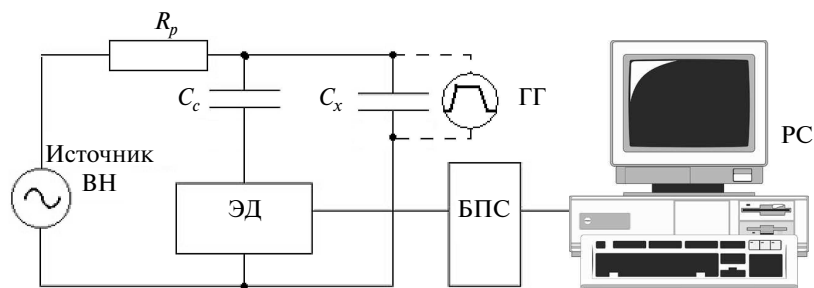


Рис. 3. Измерительная схема регистратора характеристик ЧР:

R_p — защитное сопротивление (150 кОм); C_x — измеряемый объект (модельный образец, стержень статорного паза), его емкость измерялась непосредственно перед проведением эксперимента и составляла от 10 до 30 пФ; C_c — соединительная емкость (250 пФ); ГГ — градуировочный генератор; ЭД — активный измерительный импеданс; PC — измеритель характеристик ЧР

мерные распределения $(q_{\text{ЧРмакс}} - \varphi)$, $(q_{\text{ЧРср}} - \varphi)$, $(n_{\text{ЧР}} - \varphi)$ за счет разбиения временной оси на определенное количество интервалов, в которых рассчитывались соответствующие параметры ЧР.

Следующий этап заключался в расчете и извлечении различительных признаков спектров ЧР. Существенным условием здесь было то, что признаки, как и первоначальные амплитудно-фазовые спектры, должны различаться между разными источниками ЧР. Размерность признакового пространства максимально минимизировалась, поскольку при этом сокращалось количество требуемых измерений и увеличивалась статистическая устойчивость результатов распознавания. В ранее существовавших методиках [6] выбор производился, главным образом, на основе прошлого опыта, интуиции или простого предположения. Такой подход существенно снижал качество распознавания. В разработанной программе эта цель достигается использованием дискриминантного анализа при расчете и выборе статистических признаков (от 1-го до 4-го центральных моментов распределений $(q_{\text{ЧРмакс}} - \varphi)$, $(q_{\text{ЧРср}} - \varphi)$ — $(n_{\text{ЧР}} - \varphi)$ и дополнительных, вводимых впервые, признаков, определяющих взаимное расположение импульсов ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения, таких как: коэффициенты асимметрии по фазе возникновения (Φ) и количеству импульсов ЧР разной полярности (Q)

$$\Phi = \frac{(\varphi_{\text{макс}}^- - \varphi_{\text{мин}}^-) - (\varphi_{\text{макс}}^+ - \varphi_{\text{мин}}^+)}{\tau};$$

$$\Phi_{\text{ср}} = \frac{\varphi_{\text{ср}}^-}{\tau} - \frac{\varphi_{\text{ср}}^+}{\tau};$$

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{\varphi_{\text{макс}}^-}{\tau} - \frac{\varphi_{\text{макс}}^+}{\tau};$$

$$Q = \frac{\sum q_i^- / \sum n_i^-}{\sum q_i^+ / \sum n_i^+}$$

и коэффициенты корреляции (CC) для соответствующих распределений

$$CC_{Q_{\text{ср}}} = \frac{\sum (q_{\text{ср}}^+ - \bar{q}_{\text{ср}}^+) (q_{\text{ср}}^- - \bar{q}_{\text{ср}}^-)}{\sqrt{(\sum (q_{\text{ср}}^+ - \bar{q}_{\text{ср}}^+)^2) (\sum (q_{\text{ср}}^- - \bar{q}_{\text{ср}}^-)^2)}};$$

$$CC_{Q_{\text{макс}}} = \frac{\sum (q_{\text{макс}}^+ - \bar{q}_{\text{макс}}^+) (q_{\text{макс}}^- - \bar{q}_{\text{макс}}^-)}{\sqrt{(\sum (q_{\text{макс}}^+ - \bar{q}_{\text{макс}}^+)^2) (\sum (q_{\text{макс}}^- - \bar{q}_{\text{макс}}^-)^2)}};$$

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

где индексы «-» и «+» относятся к параметрам спектров ЧР соответствующей полярности, τ — продолжительность полупериода.

Характеристические признаки формируют базу данных, которая использовалась для установления канонических дискриминантных функций (рис. 4) при определении границ кластеров для каждого типа обучающих ЧР. Качество разработанных решающих правил распознавания оценивалось по контрольной выборке, в которую входили модельные экзаменационные образцы с известными по геометрическим размерам и расположению дефектами, а также реальные образцы статорной изоляции (стержни, катушки, статорная обмотка в сборе) на этапе сдаточных испытаний.

Исследование ЧР на реальных образцах изоляции статорной обмотки проводилось на этапе сдаточных испытаний в заводских условиях. Целью испытаний была оценка качества изготовленной изоляции и определение с использованием разработанной программы распознавания типов технологических дефектов с последующим их исправлением путем оптимизации технологических режимов на стадии изготовления изделий. Дополнительно испытания реальных образцов изоляции позволили подтвердить работоспособность разработанной методики распознавания дефектов в производственных условиях. Особый интерес представляли испытания по регистрации ЧР в изоляции отбракованных стержней. В частности, одной из основных причин отбраковки является высокое значение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции (критерий отбраковки — $\Delta \text{tg} \delta > 0,5 \%$).

При измерении ЧР в изоляции отбракованного стержня было установлено, что амплитудно-фазовые спектры ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения симметричны. Величина $q_{\text{ЧРмакс}}$ составляла 3100 пКл при 3,6 кВ и 10000 пКл при

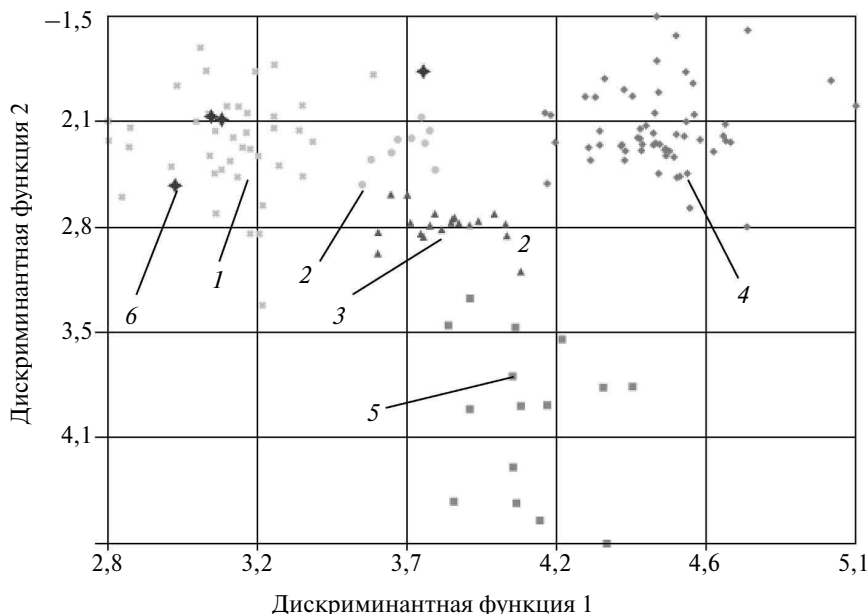


Рис. 4. Диаграмма рассеяния канонических значений для пар наиболее значимых дискриминантных функций (точками «Добавленные данные» отмечены данные по ЧР в изоляции стержне с повышенными значениями диэлектрических потерь для гидрогенератора типа СВ 484/110):

- 1 — «пора в изоляции»; 2 — «дефект пазового покрытия»; 3 — «отслоение в изоляции»;
- 4 — «дефект полупроводящего лобового покрытия»; 5 — «нормальные условия»;
- 6 — «добавленные данные»

4,5 кВ. Эти значения высоки, что свидетельствует о наличии серьезного повреждения исследуемой изоляции. На рис. 4 представлена диаграмма рассеяния канонических значений для пар наиболее значимых дискриминантных функций, где приведены точки («Добавленные данные»), характеризующие амплитудно-фазовые спектры ЧР в изоляции исследуемого стержня.

Как следует из представленных результатов, эти точки наиболее близко располагаются к центру кластера 1 «Пора в изоляции». Следовательно, предполагаемый дефект изоляции испытываемого стержня с высокой вероятностью представляет собой нарушение сплошности корпусной изоляции в виде газовой поры. Препарирование корпусной изоляции данного стержня продемонстрировало наличие таких пор.

Оптимизация технологического процесса (ужесточение контроля процесса намотки слюдосодержащих лент) и замена материала внутреннего проводящего слоя привели к снижению диэлектрических потерь изоляции стержней и, как следствие, к снижению интенсивности ЧР. Величина $q_{\text{ЧРМакс}}$ становится существенно ниже, она не превышает 2300 пКл при 3,6 кВ и 3100 пКл при 4,5 кВ. Следовательно, можно предположить, что дефекты в системе изоляции отсутствуют или их размеры существенно уменьшились.

Таким образом, было получено практическое подтверждение обоснованности применения разработанной методики распознавания дефектов по статистическим характеристикам ЧР при проведении приемо-сдаточных испытаний статорной обмотки высоковольтных электрических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ энергоэффективности экономики и развития электроэнергетики России [Текст] // Рынок электротехники.— 2007. № 1(5).— С. 25–37.

2. Stone, G.R. Objective Methods to Interpret Partial-Discharge Data on Rotating-Machine Stator Windings [Текст] / G.R. Stone [et al.] // I EEE Trans. on Industry



Application.— 2006. Vol. 42, № 1.— P. 195—200.

3. **Кучинский, Г.С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях [Текст] / Г.С. Кучинский.— Л.: Энергия, 1979.— 224 с.

4. **ГОСТ 20074—83.** Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов [Текст] // М.: Изд-во стандартов, 1983.— 20 с.

5. **IEC 60034—27.** Rotating Electrical Machinesю Part 27: Partial Discharge Off-line Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Machinery [Текст].— 2005.— 44 p.

6. **Caprara, A.** Partial Discharge Source Recognition in VPI Machines [Текст] / A. Caprara [et al.] // Proc. 10th Insucon Int. Conf.— Birmingham, 2006.— P. 236—240.