



РАССОВСКИЙ В.Л.

УДК 537.529

РАССОВСКИЙ В.Л., Главн. инж., зам. гендиректора
ПАТ "Укргидроэнерго":

ТИТКО В.А., мл. научн. сотр.,

ШМАТКОВ В.Л., инж. Институт электродинамики НАНУ, г. Киев

ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ТУРБО- И ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Предложена методика регистрации частичных разрядов в обмотках статора гидро- и турбогенераторов с анализом результатов измерений по шести параметрам и представлении результатов в виде лепестковой диаграммы и вводом нового интегрального диагностического параметра, что позволяет наглядно сравнивать текущее техническое состояние изоляции статора с предыдущими измерениями, и упрощает прогнозирование ремонта.



ТИТКО В.А.

Традиционные методы контроля состояния изоляции электрооборудования повышенным напряжением требуют вывода оборудования из эксплуатации и, зачастую, приводят к ухудшению свойств изоляции. Этот вид контроля даёт исчерпывающие сведения о состоянии электроизоляции оборудования на момент испытаний, но не позволяет получать оперативную информацию о состоянии генератора в процессе эксплуатации.



ШМАТКОВ В.Л.

Кроме того, вывод из эксплуатации мощного турбогенератора на период испытаний и регламентных работ приводит к значительным экономическим потерям

Альтернативой дорогостоящему и опасному методу высоковольтных испытаний изоляции электромашин служит, получающий всё большее распространение, метод регистрации частичных разрядов (ЧР) в изоляции электромашины, работающей в штатном режиме

Постановка проблемы.

На сегодняшний день наиболее целесообразным средством повышения надежности работы и экономической эффективности электрооборудования является внедрение методов и средств оперативной диагностики оборудования в целом и состояния изоляции, токонесущих частей в частности, как наиболее уязвимой составляющей оборудования.

Упомянутый ранее метод регистрации частичных разрядов в изоляции позволяет выяснить:

- текущее техническое состояние генератора, дефекты изоляции которые могут обусловить ухудшение этого состояния;

- остаточный ресурс работы генератора, на данный момент времени, при котором возможна его безаварийная эксплуатация;

- какие регламентные и ремонтные работы (по объёму и срокам проведения) должны быть проведены для продления безаварийной эксплуатации.

Анализ распределения ЧР позволяет создать базу данных, которая может содержать информацию о результатах ЧР-тестов, текущих параметрах оборудования и других факторах, влияющих на работу оборудования. Однако этот метод основан на очень сложных электрофизических процессах и для использования его в качестве однозначного определения состояния изоляции необходимы дальнейшие исследования по изучению этих процессов и поиск новых диагностических признаков, увеличение которых повышает достоверность диагностирования.

В этой работе ограничимся рассмотрением 6-ти параметров, характеризующих частичный разряд, а именно: амплитуды импульса (A , А), усреднённой частоты следования импульсов (N , Гц), длительности импульса ЧР (t , сек), кажущегося заряда импульса (q , К), тока импульса (I , А), мощности импульса ЧР (P , Вт).

Предметом исследования являются частичные разряды в образцах изоляции обмоток крупных электрических машин.

Методы исследования.

- Измерение ЧР в образцах электрическим способом и запись результатов в базу данных.

- Использование статистических методов и метода наименьших квадратов (МНК) для обработки результатов измерений.

Анализ состояния современных исследований метода регистрации ЧР. Регистрация частичных разрядов в электрической изоляции на действующем оборудовании сопряжена с рядом технических трудностей. В большой степени это



связано с отсутствием данных для идентификации дефектов по характеристикам ЧР и влиянием на регистрируемые характеристики ЧР параметров оборудования и элементов измерительной цепи. В этой связи большой интерес представляют работы Вдовико В.П. и др. [3], в которых предложен метод измерения ЧР в изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования. Метод позволяет получать результаты с достаточно высокой достоверностью и находит применение на практике.

В работе [4] и методических рекомендациях РД ЭО-018700 [5] анализируется возникновение ЧР в изоляции мощных электродвигателей и приводятся рекомендации по начальной обработке результатов измерений.

В последние годы развиваются аналитические методы исследования и прогнозирования возникновения и развития ЧР. Так в [7] рассмотрена эквивалентная схема для исследования механизма возникновения частичных разрядов в диэлектриках и методика кластерного анализа частичных разрядов, позволяющая оценить техническое состояние изоляции и дать прогноз развития дефектов, приведен алгоритм в системе MATLAB.

Термины и параметры, которые характеризуют сигналы ЧР. Частичные разряды – небольшие электрические искры (микроразряды), проявляющиеся внутри находящейся под высоким напряжением изоляции обмотки статора, при наличии в ней микроскопических инородных включений или пустот. Обычно, качественно изготовленная обмотка статора, находящаяся в хорошем состоянии, демонстрирует очень низкую активность ЧР.

Стандарты и материалы по ЧР базируются на понятии "кажущийся заряд". Под "кажущимся" понимают заряд, который поступает от источника питания установки в контролируемое оборудование для компенсации энергии, израсходованной при возникновении микроразряда в толще изоляции.

Величина импульса, возникшего в теле изоляции нам неизвестна, и мы определяем некую корреляцию между реакцией оборудования, отображенной на приборах, и реальным событием, и толщиной изоляции.

Опыт показывает, что с ухудшением параметров обмотки статора из-за вибрации, работы при высоких температурах или химических загрязнений, активность ЧР возрастает в десятки раз. Таким образом, слежение за уровнем ЧР дает представление о причинах кризиса изоляции и возможного выхода обмотки статора из строя.

Так как слежение за уровнем ЧР проводится в процессе эксплуатации генератора в режиме

"on-Line", то изменение параметров ЧР позволяет сделать прогноз регламентных работ.

В соответствии с нормами международного стандарта IEEE 1434-2000 [2] определены следующие основные параметры ЧР:

- максимальная амплитуда положительных и отрицательных импульсов ЧР на уровне частоты повторения $10 \text{ имп/сек} \pm Q_m$;

- общая ЧР-активность $\pm NQN$ (Normalized Quantity Number);

- положение импульсов ЧР ϕ относительно фазы напряжения 50 Гц.

- американский стандарт предлагает использовать в качестве диагностического параметра интенсивность ЧР – *PDI* (Partial Discharge Intensity). В этом случае вместо мгновенного напряжения в момент возникновения импульса ЧР, берется действующее значение приложенного напряжения.

В соответствии с действующим в настоящее время ГОСТ 20074-83 [1], ЧР количественно характеризуются кажущимися зарядами q единичных ЧР и частотой n их следования.

Предусматривается измерение частоты следования импульсов ЧР - n_i с амплитудами в интервале значений $U_{mi} \pm \Delta U$. В результате измерений формируется ряд чисел U_{mi} и n_i , характеризующий зависимость $f(U_{mi}, n_i)$ числа импульсов ЧР в единицу времени от величины амплитуды.

Кажущийся заряд измеряется в пикокулонах или нанокулонах. Если суммировать все заряды, зарегистрированные оборудованием за одну секунду, получим ток $I_{\text{ЧР}}$ – тот ток, который дополнительно протекает в схеме за счет возникновения ЧР.

$$I_{\text{ЧР}} = n_i \cdot q. \quad (1)$$

В литературе по исследованию ЧР, принято считать этот ток чисто активным и характеризующим потери в изоляции из-за возникновения ЧР. Энергия, которая дополнительно вводится в оборудование из-за единичного ЧР, равна заряду, умноженному на напряжение, приложенное к образцу. Сумма зарядов накопленных импульсов дает полную энергию частичных разрядов.

Средняя мощность ЧР по ГОСТ 20074-83 рассчитывается, как:

$$P = \frac{1}{T} (q_1 U_1 + q_2 U_2 + \dots + q_m U_m), \quad (2)$$

где T – время наблюдения, сек.; m – число наблюдаемых импульсов за время T ; q – кажущийся заряд; U – напряжение на образце; P – мощность разрядов, Вт.

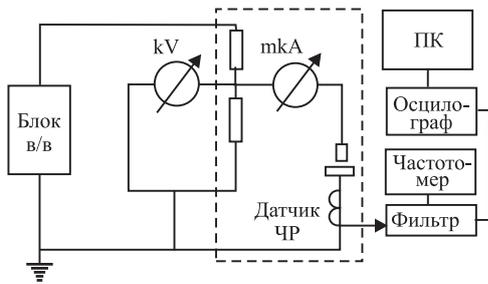


Рис. 1. Электрическая схема экспериментального стенда

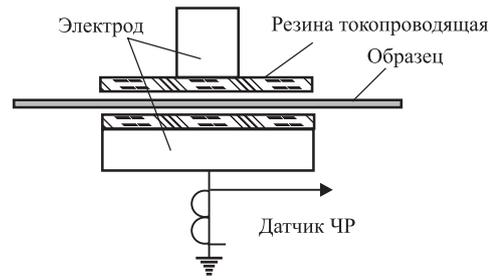


Рис. 2. Физическая модель для исследования ЧР в изоляции

С течением времени, периодически повторяющиеся частичные разряды приводят к преждевременному старению и разрушению изоляции. Таким образом, регистрация частичных разрядов, оценка их мощности и повторяемости, а также локализация места их возникновения, позволяет своевременно выявить развивающиеся дефекты изоляции и принять необходимые меры.

Цель исследования:

- регистрация сигналов ЧР в образцах изоляции под высоким напряжением,
- разработка математического аппарата, облегчающего анализ результатов измерений,
- сравнительный анализ результатов измерений,
- создание экспертной базы данных на основе сравнительного анализа результатов измерений.

Применяемая аппаратура:

- аналоговый осциллограф с полосой пропускания 100 МГц,
- аналоговый фильтр с полосой пропускания 40 МГц,
- цифровой осциллограф,
- 16-канальный АЦП,
- персональный компьютер,
- генератор эталонных импульсов наносекундного диапазона И1–7.

В качестве датчиков применяются:

- Датчики RTD-3,
- Датчик RFCT-1,
- Датчик тока ДТЭ компании LEM.

Методика исследования

- Контролируемый образец зажимается между электродами через прокладки из токопроводящей резины.

- Производится градуировка системы регистрации.
- Оборудование ставится под напряжение, регистрируются импульсы ЧР в образце.
- Сохранение данных в памяти осциллографа и передача их в компьютер.
- Экспертный анализ полученных данных.

- Запись данных в экспертную базу.
- Последовательность повторяется для очередного образца.

Структурная схема экспериментального стенда, соответствующая ГОСТ 20074-83 представлена на Рис. 1

Узел измерений представляет собой два медных электрода, между которыми размещается проверяемый образец. Структура узла измерений приводится на Рис. 2.

Характеристика и результаты проведенных экспериментов. Было исследовано 5 серий образцов толщиной 0,7–0,4 мм с шагом 0,1 мм. Для каждого образца по результатам испытаний создана база данных, которая описывает совокупность признаков его состояния.

В процессе обработки результатов измерений производится нормирование математического ожидания 6-ти признаков, описывающих импульс, относительно их суммы. При этом получаем образ состояния образца (A_y), описанный в 6-мерном пространстве признаков (A_y)= $\{x_{1Ay}, \dots, x_{6Ay}\}$.

Для каждого признака $\{x_{nAy}\}$ производится ранжирование признака по возрастанию, определение границ диапазона значений, расчет прироста значений признака относительно предыдущего значения, нормализация крайних значений диапазона.

Обработка результатов измерений позволяет создать экспертную базу данных, которая, будучи совмещена с оценками экспертов, позволит создать научную платформу для исследования и прогнозирования свойств изоляции крупных электрических машин.

Полученное при исследовании образца поле из 6-ти признаков позволяет построить плоскую шестилепестковую диаграмму, графически отражающую образ состояния эталонного образца; диаграмма отличается высокой наглядностью и позволяет удобно сопоставлять результаты измерений простым наложением. Векторы откладываются от единого начала координат (Рис. 5, 6). При построении применяется метод масштабирования по каждому параметру.

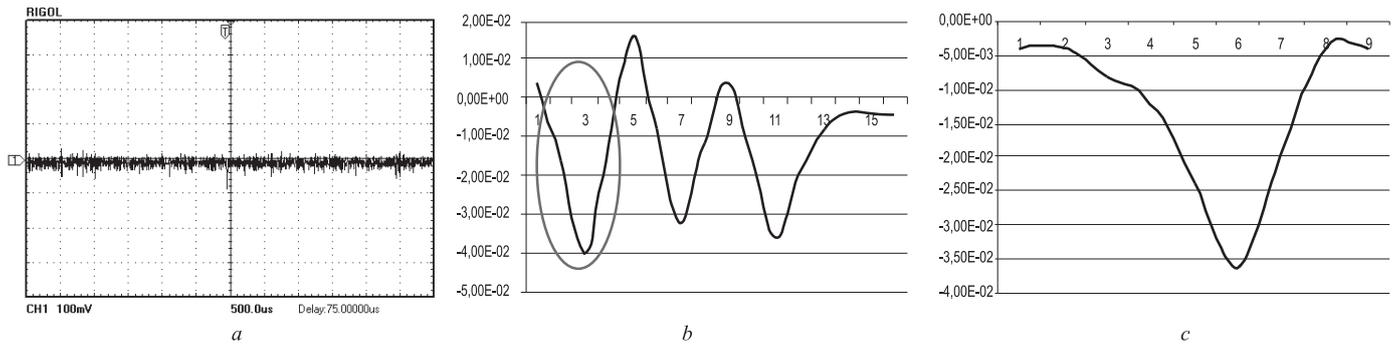


Рис. 3.

a – Поток импульсов, полученный при записи данных; *b* – В овале – импульс ЧР, выделенный схемой антисовпадений по референсному каналу; *c* – Аппроксимирующая кривая для расчёта параметров ЧР

Такой способ представления диагностических параметров позволяет найти ещё один параметр – интегральный диагностический параметр по совокупности имеющихся параметров.

Этот параметр может характеризоваться площадью построенной диаграммы, которая, в данном случае рассчитана по формуле:

$$S = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^6 a_i \cdot a_{i+1}, \quad (3)$$

где элементами a_i обозначена последовательность выбранных шести диагностических параметров. При этом $a_7 = a_1$. При рассмотрении n диагностических параметров интегральный параметр будет иметь вид

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i \cdot a_{i+1} \sin \frac{2\pi}{n}. \quad (4)$$

Определение допустимых границ при диагностике для параметра S требует дополнительных исследований.

При исследовании работающих электромашин на этот эталон может быть наложен графический образ состояния изоляции электромашины. Интегральное представление результатов измерения характеристик ЧР позволяет весьма наглядно оценивать состояние изоляции по совокупности параметров диагностирования.

В качестве примера, поясняющего ход испытаний, приведены характерные моменты исследования 2-х различных образцов – образца толщиной 0,8 мм с малой интенсивностью ЧР (пункт 1) и образца с большой интенсивностью ЧР (пункт 2).

Пункт 1. Образец толщиной 0,8 мм. Напряжение на образце 12,4 кВ, ток утечки 28 мкА.

Наблюдаются импульсы ЧР с усреднённой частотой 60 Гц и средней амплитудой примерно 30 мВ.

Импульсы ЧР на образце по амплитуде сравнимы с уровнем шумов оборудования, Рис. 3, *a*). В овале на Рис. 3, *b*) показан импульс ЧР с растяжкой по времени, отфильтрованный из общего потока схемой антисовпадений. Задний фронт импульса переходит в быстро затухающий колебательный процесс, обусловленный параметрами регистрирующей аппаратуры.

По табличным данным, полученным при записи результатов эксперимента, построена аппроксимирующая кривая (Рис. 3, *c*) для расчёта характеристик ЧР. Результаты анализа исследования образца представлены на Рис. 5 в форме лепестковой диаграммы. Область характеристик имеет малую площадь, что свидетельствует о хорошем состоянии изоляции исследуемого образца.

Пункт 2. Образец толщиной 0,6 мм. Напряжение на образце 12,4 кВ, ток утечки 34 мкА.

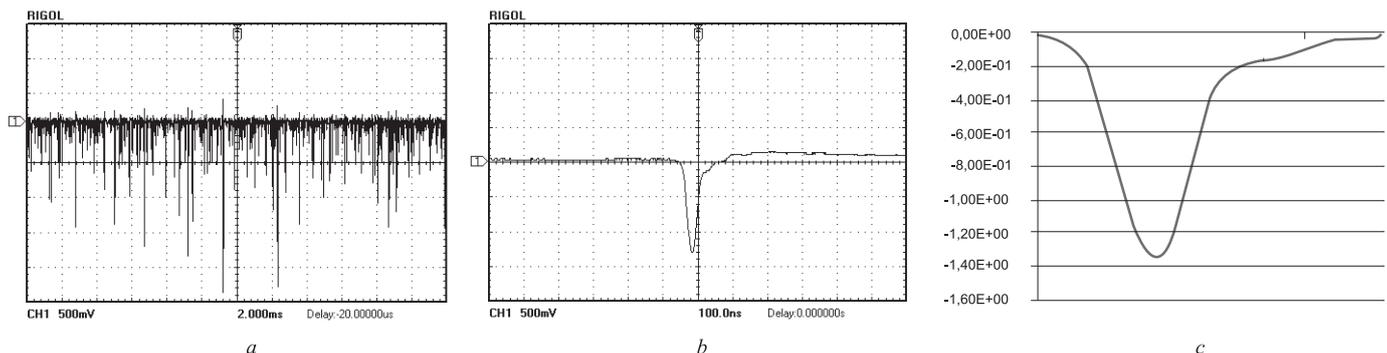


Рис. 4. Характерные осциллограммы импульсов образца изоляции с большой интенсивностью ЧР.

a – Поток случайных импульсов ЧР разной амплитуды и частоты; *b* – Одиночный импульс, отфильтрованный для анализа; *c* – Аппроксимирующая кривая, соответствующая отфильтрованному импульсу, для расчёта параметров ЧР

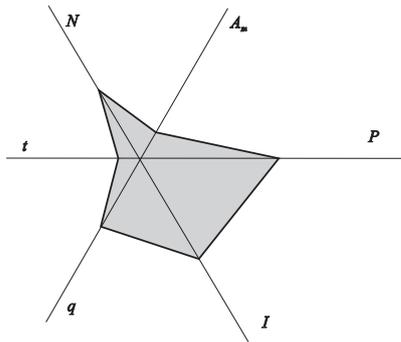


Рис. 5. Область характеристик образца с малой интенсивностью ЧР

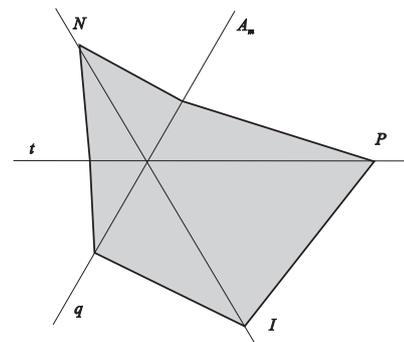


Рис. 6. Область характеристик образца с большой интенсивностью ЧР

На Рис. 4 представлены осциллограммы, полученные в результате исследования тонкого образца изоляции. По табличным данным, полученным при записи результатов эксперимента, построена аппроксимирующая кривая (Рис. 4, с) для расчёта характеристик ЧР.

Для этого образца отчётливо заметны увеличение длительности, амплитуды и частоты импульсов ЧР, что отразилось в существенном увеличении площади и формы лепестковой диаграммы области характеристик этого образца, представленной на Рис. 6.

Сравнение диаграмм Рис. 5 и Рис. 6, позволяет сделать вывод о низком качестве изоляции образца, представленного диаграммой Рис. 6. Это подтверждает предложенный в этой работе интегральный параметр. Для первого варианта (Рис. 5) $S = 30,5$ о.е., для второго варианта (Рис. 6) — $S = 121,1$ о.е.

Сравнение результатов исследования двух образцов показывает на достоверность метода диагностирования состояния электроизоляции путём измерения интенсивности ЧР на основе принятых параметров и математических средств обработки и представления результатов измерения.

В процессе эксперимента была сделана попытка обнаружить уникальные отличительные признаки, характерные для повреждения изоляции интенсивными потоками частичных разрядов. Характерными признавались результаты, повторяемость которых наблюдалась не менее, чем в 70 % экспериментов.

Выводы:

1. Разработана и изготовлена испытательная камера и модельные образцы изоляции для проведения исследований.

2. Разработана методика проведения измерений обработки и представления сигналов частичных разрядов в образцах изоляции обмотки статора турбо- и гидрогенераторов, в т. ч. минимизировано влияние параметров измерительной цепи на результаты измерений.

3. Исследованы особенности развития частичных разрядов в образцах изоляции.

4. Разработана методика построения лепестковых диаграмм, обеспечивающая наглядность сравнения результатов измерений.

5. Введён интегральный диагностический параметр по совокупности рассматриваемых параметров, характеризующих сигналы ЧР.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 20074-83 Электрооборудование и электроустановки. Методы измерения характеристик частичных разрядов.
- IEEE Std 1434-2000 "Trial Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery"
- Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. — Новосибирск: Наука, 2007. — 155 с.
- Кушинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — Л.-М.: Энергия, Ленинград. отд., 1979.
- РД ЭО-018700. Методические рекомендации по диагностике изоляции статорных обмоток вращающихся машин классов напряжения 3,15–24 кВ по характеристикам частичных разрядов. — М.: МРФ по АЭ, 1999.
- Силинский В.П. Эквивалентная схема для исследования механизма частичных разрядов в диэлектриках. — В кн.: Устройства питания и электропривода малой мощности, т. 2 — М.: Энергия, 1970.
- Агамалов, О. Н. Кластерный анализ частичных разрядов для оценки технического состояния // Электричество. — 2006. — № 7. — С. 56–62.

© Рассовский В.Л., Титко В.А., Шматков В.Л., 2011

