СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РАЗРЯДЕ

СЛАВИНСКИЙ А.З., д.т.н., УСТИНОВ В.Н., КАССИХИН С.Д., Завод «Изолятор» – 000 «Масса» АКСЕНОВ Ю.П., д.т.н., ЯРОШЕНКО И.В., к.т.н., АО «ДИАКС»

Особенность современного развития энергетики – внедрение новых конструкций машин, аппаратов, кабелей и т.д. При этом используются новые виды изоляционных конструкций и изоляционных материалов, это относится к элегазовым аппаратам, КЛ с полиэтиленовой изоляцией, вводам [1]. На практике уже фиксировались значимые отклонения в надежности изоляционной конструкции [2], в некоторых случаях и с повреждениями (элегазовые трансформаторы тока, кабельные муфты, корпусная изоляция стержней электрических машин) [3]. Последнее обусловлено тем, что последовательность формирования и развития дефектов в новых видах изоляции несколько отличается от привычных маслонаполненных конструкций, по которым объем контроля и диагностирования достаточно отработан и определен директивными документами.

иже будут приведены данные о Пприменении в практике диагностического анализа элементарных физических явлений при ЧР в практических конструкциях аппаратов, по которым появляется возможность определять интенсивность (энергию разрушения от ЧР) в дефектах с учетом особенностей конструкции с локализацией зоны разряда (ЧР) в условиях завода [4] и эксплуатации. Это дает возможность оценивать остаточный ресурс и риск повреждения, что обосновывается приведенными данными по признакам элементарных явлений и опыту их определения в практических обстоятельствах, в заводских (при испытаниях изделий), а также рекомендуемых для условий эксплуатации на действующих объектах.

Вторым практическим результатом являются факты, когда полученные данные по характеристикам ЧР дефекта и локации его зоны в реальной конструкции позволяют установить пределы того, возможно ли визуальное обнаружение микроочага ЧР в теле диэлектрика. По реальным измерениям показано, в каких условиях развития ЧР в диэлектрике возможно обнаружение следов дендрита.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДАХ В МОДЕЛИРУЮЩИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Разрядные явления в газах хорошо изучены, в них определены основные разрядные характеристики ионизационных явлений, включая:

 простейшее – «электронная лавина» (на воздухе импульс Тричела); результат воздействий многими лавинами – «стример»;

образование «объемного заряда»;

 «искрения между металлическими деталями при протекании тока.

Указанные явления могут быть использованы для анализа процессов в разрядных ситуациях в изоляционных конструкциях, используя «распознавание образа» по сопоставлению «отпечатков пальцев» (finger print). Образы (finger print) для элементарных явлений при ионизации газовых промежутков даны в табл.1. Измерения проведены в рамках настоящей работы.

Пробой газа в неоднородном поле (таблица 1, a,b,c)

Пробой газа в неоднородном и однородном полях заметно различается. Особенность пробоя газа в неТаблица 1. Определение базовых признаков элементарных явлений (распознавания образов, finger print) при разряде на моделях в газах

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ РАЗРЯДА В ГАЗЕ ДЛЯ СЛАБОНЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ



 Колебательный импульс от СТ – показывает наличие свободных зарядов в промежутке.

 Длинный хвост на импульсе – «е» соответствует «длительному» дрейфу положительных ионов.

с) При отрицательной полярности конуса



ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ РАЗРЯДА ПРИ НАЛИЧИИ В промежутке пленок или металлических стружек

b) Пленки в промежутке для исключения образования сквозного пробоя



Элементарные процессы при разряде между пленками сопровождаются серией лавин

d) Разрядные явления при искрениях в металлических контактах



Элементарные явления при разряде с отрицательного острия сопровождаются серией лавин, свободные заряды не образуются

однородном поле – возникновение частичного разряда в виде электронной лавины в местах, где напряженность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом лавинных явлений в стример и пробой промежутка. Структура импульса от лавины (a,b,c) будет использоваться как "finger print" при анализе явлений в изоляционных конструкциях.

Механизм разрядных явлений при искрениях (протекание тока в металлическом контакте, табл.1-d)

Напряжение на промежутке в металлическом контакте мало, и поэтому ударная ионизация невозможна, т.о. ток искрового разряда определяется не перемещениями электронов и ионов, а перемещением частиц металла с образованием «мостиков», с обрывами и перегораниями микровыступов на контактирующих поверхностях.

Явление соответствует «фриттингу», т.е. имеет место переходный процесс при «сгорании» мостика между микровыступами и образования нового контакта, это приводит к появлению импульсов. Факт переноса заряда с отрывом металла от пленки подтверждается визуальным анализом следов разрядов, в точках катодных пятен имеет место отсутствие (выгорание) металла на поверхности.

Механизмы старения диэлектриков

Механизм старения – воздействие ЧР в газовых или воздушных порах.

Частичный разряд – локальный лавинный или стримерный разряд, который оказывает разрушающее воздействие на диэлектрик за счет влияния

ющих при гальванических контактах и перегорании микровыступов (фриттинг)

температуры от разряда. Интенсивность ЧР зависит от напряженности поля, с течением времени их действие нарастает. Это ведет к разложению материала, появлению проводящих частиц (обуглероживанию), и к зарождению дендрита.

Дендрит – древовидное образование в теле диэлектрика, имеющее повышенную проводимость с прогрессирующим разрушением диэлектрика.

ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ RIP ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Особенности проведения испытаний Испытания проводились с контролем осциллограмм одиночных импульсов и энергетическим характеристикам по-



Рис. 1. Внешний вид образца RIP изоляции для длительных испытаний



Рис. 2. Обобщение изменений разрядных явлений во время длительных испытаний образца № 3 с обозначением стадий развития разрядных явлений



Рис. 3. Формы разрядных явлений в стадиях по результатам практических измерений для применения в методе «распознавания образов» ("finger print")

тока импульсов по распределениям n(Q), где Q – амплитуда, мВ; n – число импульсов в единицу времени. При этом мощность разрядов рассчитывается по выражению P~[QndQ.

Структура осциллограмм будет использоваться для распознавания элементарных явлений при ЧР в образце (по "finger print" и табл.1). Мощность разрядов – основной фактор, определяющий темп разрушения изоляции, т.е. ее ресурс.

Для проведения испытаний образцы устанавливаются в высоковольтную установку. Образцы (рис. 1) изготовлены по заводской технологии. Измерения характеристик ЧР на образцах (осциллограммы структуры импульсов для finger print, функции распределения n(Q) для оценки мощности) проводились от момента приложения напряжения до пробоя изоляции.

Анализ обобщенных тенденций динамики изменений

электроразрядных явлений

Типичные по нескольким образцам закономерности развития разрядов при длительных испытаниях по анализу тренда *P*(*t*) даны на рис. 2. В указанной зависимости P(t) (мощности разряда от времени) есть четыре стадии (рис. 2):

- I стадия возникновение ЧР;
- II стадия рост мощности ЧР;
- III стадия максимальная мощность;

IV стадия – отсутствие ЧР, ток утечки.

«Стадии развития» определяются по особенности элементарных явлений при использовании данных о структуре импульсов от разрядов при применении подходов «распознавания образов» ("finger print"). Типичные структуры импульсов для каждой стадии в образцах приведены на рис. 3. Указанный подход может быть использован для определения состояния любой изоляции с монолитным диэлектриком:

Из анализа структур осциллограмм (рис. 3) следует:

 а) фиксируется развитая форма (осциллограмма «а»), лавины с образованием объемного заряда (аналогично табл.1-а) на второй стадии;

б) на третьей стадии – явления в лавинной форме – на рис.3«б» (finger print, табл.1-b,c);

в) «Мертвый период» – четвертая стадия (рис. 3-в), отсутствие импульсных явлений, измерения за 16 минут до пробоя. На «четвертой стадии» фиксировался ток утечки через канал пробоя и емкостной ток. При максимальной ЧР-активности ток составлял 6 мА. В предпробойный период ЧР отсутствовали и имел место только ток проводимости величиной ~2–3 мА. При таком токе проводимости активизируются тепловые явления в канале, импульсы перед пробоем отсутствовали.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСПЫТАНИЙ И ЛОКАЦИИ ЗОН ДЕФЕКТОВ С НАЛИЧИЕМ ЧР В ИЗОЛЯЦИИ ВВОДОВ 35 КВ Схема проведения измерений

Испытательная и измерительная установка показана на рис. 4. Для проведения испытаний были изготовлены специальные опытные образцы высоковольтных вводов на 35 кВ с частичными разрядами выше существующих норм. Это достигалось специально подобранным температурным режимом полимеризации с большим температурным перепадом по высоте изделия, приводящим к значительным термомеханическим напряжениям в твердой изоляции и, как следствие,



Рис. 4. Установка для контроля характеристик

- разрядов в изоляторе: а ввод;
- б измерительный импеданс «СТ»;
- в конденсаторы; г источник ВН «АИД».



Рис. 5. Вариант измерений ЧР с экранированием ввода металлическим листом, экранирующим датчик, при этом датчик ТМР экранирован листом:

а) Общий вид испытаний.

б) Расположение датчика «ТМР-2» с внешней, экранированной стороны листа



Рис. 6. Процедура измерений характеристик ЧР при увеличении и снижении напряжения

«а» Диаграмма изменения мощности разрядов в процессе опыта (N4472)

«б» Диаграмма изменения мощности разрядов при измерении U_{исп}(t) (фиксируется наличие гистерезиса). Мощность при снижении значимо меньше, чем при подъеме.

к ЧР. Напряжение от АИД подавалось на фланец изолятора. Измерения ЧР выполнялись в контуре «Емкость ввода – емкость конденсаторов 250 пФ». Импульсы ЧР измерялись резистивным шунтом – *R*=50 Ом, трансформатором тока «СТ» и диполем – «ТМР-2». Структура импульса от тока разряда фиксировались на осциллографе, анализ потока импульсов проводился анализатором импульсов РDPA. Локация зоны дефекта в изоляции проводилась датчиком «ТМР-2», передвигаемым вдоль ввода по линейке (рис. 4).

Чувствительность измерений подвижным датчиком являлась достаточной для локализации зоны ЧР в изоляции при его удалении от корпуса ввода на ~200 мм. При этом следует указать, что на чувствительность нет влияния даже при размещении между датчиком и вводом алюминиевого листа (рис. 5), экранирующего источник ЧР, при этом амплитуда импульса и мощность при измерениях при наличии экрана и без экрана отличаются не более 10 %.

Процедура проведения измерений n(Q) при увеличении и снижении напряжения

Напряжение $U_{\text{исп}}(t)$ плавно увеличивалось до зажигания разрядов, выдерживалось, и далее снижалось до погасания. Кривые изменений $P(U_{\text{исп}})$ даны на рис. 6-а при подъеме от точки № 1 до точки № 2 и снижении до точки № 3. На каждой ступени фиксировалось распределение n(Q), по которым вычислялась мощность разрядов – Р (диаграмма на рис. 6-6).

Изменение Р во время измерений отображается на диаграмме изменения мощности – рис. 6-б на подъеме и при снижении Uисп имеет место значительное уменьшение Р при снижении, т.е. есть признаки гистерезиса.

Определение форм разрядных явлений

Форма разрядных явлений (finger print) определялась по структуре основных явлений, разряд в лавинной форме – рис. 7-6 и рис. 8-в, а также



а) Фазовое расположение разряда на синусоиде 50 Гц

б) Определение формы разряда по структуре импульса



Расположение импульса на максимуме синусоиды соответствует тому, что разряд формируется на электроде

Рис. 7. Структура импульсов в лавинной форме с контактом к электроду (распознавание образа (finger print) с учетом данных табл. 1-с)

Форма разрядного явления – серия лавин от металлической поверхности (finger print – табл.1-b)









б) Импульс от ЧР, разряд внутри диэлектрика, при наличии контакта с металлом

в) Разряд внутри изоляции, серия лавин (finger print – табл.1-с)

Датчик TMP-2

Рис. 8. Структура импульсов для распознавания образа (finger print) с учетом данных табл. 1-b, для явления внутри изоляции, без контакта с земляным или высоковольтным электродом



СН1-ТМР-2 500мВ/дел СН2-СТ-30 500мВ/дел Рис. 9. Структура разрядных явлений в виде последовательных импульсов в лавинной форме (разряд внутри диэлектрика)



ЧР - разряд с накоплением заряда и компенсацией заряда (рис. 8-б).

Следует указать, что разряд может быть одиночным (рис. 7-б), но может быть в виде серии последовательных разрядов в лавинной форме.

Важным является фазовое расположение импульса от разряда на синусоиде 50 Гц, на тах разряд формируется на электроде, высоковольтном или земляном (рис. 7-а). Если же разряд происходит внутри изоляционной конструкции (без контакта с электродами), то импульс сдвинут относительно тах из-за влияния накопленного заряда (рис. 8-а).



N(Q) измеренное с СТ-30. Время: 9:55

Анализ стабильности разрядных явлений при локации зон ЧР при длительном приложении напряжения

В соответствии с процедурой, после зажигания ЧР проводилась длительная выдержка, при которой фиксировалась последовательность измерений n(Q). В большинстве дефектов происходило затухание ЧР и его прекращение. При этом для специального ввода, при ЧР внутри диэлектрика, фиксировались отдельные ЧР экстремальной амплитуды, это показано на рис. 10-а, через 5 мин. явления перешли к нормальному развитию (рис. 10-б). Вероятно, что при этом ЧР были в одной зоне, т.е. в одном канале.

Для другого ввода фиксированная ситуация, в которой ЧР были в двух отличающихся зонах. Результаты измерений потока импульсов – n(Q) для указанного ввода на рис. 11, расчет мощности – Р по каждому измерению - на рис. 12.

Из измерений следует, что фиксируются (рис. 11) два явления в начале опытов (измерения «а», рис. 11), при этом имеют место две характеристики явлений:

 «Явление I» – Q_{тах}~200 mV, n~5 имп/ пер, мощность Р=400 о.е. Локализовано в нижней части ввода, по рис. 14. зона «А»;

■ «Явление II» – *Q_{max}*~700 mV, n~1 имп/пер, мощность Р=600 о.е. Локализовано в средней части ввода, зона «В».

При дальнейшей выдержке (измерения «б, в» и т.д.) явление І «затухло». Явление II было стабильным, это следует из диаграммы рис. 9.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛОКАЦИИ ВО ВВОДАХ ЗОН С НАЛИЧИЕМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Измерения (рис. 4) проводились датчиком TMP-2, который перемещался по высоте изолятора, и устанавливался в 11 положениях (по высоте). Точки (рис. 14) нанесены на линейку. Пример локации зон дефектов по результатам измерений n(Q), которые приведены на рис. 13, при этом диаграмма мощности по точкам контроля - на рис. 13-а, максимальная амплитуда по Q дана на рис. 13-б.

Рис. 10. К анализу стабильности ЭРА в изоляции (ЧР в одной зоне): а) Во время 950 экстремально высокая амплитуда Q 15 B, б) Через 5 мин. нормальный уровень ЧР



Рис. 11. Распределения n(Q) для последовательности измерений на вводе с двумя зонами горения ЧР; по рис.14 "явление I" в зоне «А», "явление II" в зоне «В» (ввод 4472) В распределении по «а» имеют место две моды I и II, соответствующие двум отличным явлениям, которые по табл.2 расположены в разных местах ввода. В распределениях «б» и «в» имеют только одна мода, для явления II. Мощности явлений I и II определены на диаграмме рис.12.



Рис.12. Диаграмма зависимости мощности от времени

Из анализа изменений максимальной амплитуды (правый хвост из n(Q)) приведен на рис. 13-а, видно, что максимум в точке 5. По сопоставлению мощности, рис. 13-6, видно, что максимум также в точке 5.

Процедура локации, аналогичная данным рис. 13, была выполнена для 4 вводов, зоны разрядов показаны на



Рис. 13. Локация зон ЧР во вводах измерениями подвижным датчиком ТМР (рис. 4)

«а» Изменение величины максимального значения Q (правый хвост от n(Q)) по точкам установки датчика (ввод N4472) «б» Диаграмма мошности при измерениях по точкам контроля для локации зоны разряда

фото (рис. 14). Результаты локации для каждого ввода с описанием явлений даны в табл. 2.

В таблице 2 показаны явления формирования ЧР за счет нескольких элементарных лавин. Во всех случаях (4 вводов) образования объемного заряда не зафиксировано, импульсы от ЧР соответствуют модельным, показанным в табл. 1-b,с. С учетом этапов (ста-

Таблица 2. Результаты локации зон разрядов и их характеристики

the second se			
Серийный номер ввода	Явления в дефекте	Фазовое расположение импульса на синусоиде 50Гц	Зона расположения разрядного явле- ния (рис.14) с распознаванием образа по сопоставлению с табл.1
N4472	«Деф.l» Искрения между металлическими частями или серия лавин в канале. «Деф.l» нестабильный, погас через 10 мин. выдержки под напряжением		«Зона А»
	«Деф.II» Серия, три элементарных лавины, стартующих от металлической поверх- ности. Разряды стабильны.	Разряд на max синусоиды, разряд контактирует с электродом.	«Зона В» сопоставление с табл.1-с (finger print)
N4194	Разряды внутри изоляции в лавинной форме из нескольких, чаще всего, из 4-х элементарных импульсов (пример рис.8-в). Были проведены длительные испытания, при этом редко фиксировались экстремально большие амплитуды (до 15В, среднее 300мВ), рис.10; разрядные явления в виде раздельных, отдельно следующих импульсов (рис.9). После длительной выдержки мощность разряда уменьшилась, но без погасания.	Разряд сдвинут относитель- но тах синусоиды, разряд контактирует с электродом.	«Зона Б» сопоставление с табл.1-b (finger print)
N5175	Частичный разряд внутри диэлектрика. Основной импульс Q=200 пКл, повторный импульс компенсации заряда 25 пКл. После длительной выдержки (5 часов) разряды прекратились.	Разряд сдвинут относи- тельно max синусоиды, т.е. разряд без контакта с электродом	«Зона В» сопоставление с табл.1-а (finger print)
N5171	Разряд в виде серии из пяти лавин. Разряд погас через 70 мин. При подъ- еме до 50кВ и длительной выдержке повторное зажигание отсутствовало.	Разряд на max синусоиды, т.е. явление происходит в контакте с электродом	«Зона Г» сопоставление с табл.1-с (finger print)



Рис. 14. Расположение зон с разрядными явлениями на обследованных вводах, точки размещения датчика обозначены цифрами (1+11), зоны разрядов обозначены буквами (А-Г)



дий) развития ЧР в твердой изоляции, раздел 2, рис. 3-а, образование заряда от многочисленных лавин соответствует 2 стадии, в финале разряды в импульсной форме отсутствуют (рис. 3-в).

ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ЗОН С НАЛИЧИЕМ РАЗРЯДНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РАЗДЕЛКЕ ИЗОЛЯЦИОННОГО СЛОЯ

Разборка изоляции проводилась для двух групп:

 первая группа – вводы, в которых разряд имеет контакт с металлическим электродом (вводы № 4472, № 5171);
вторая группа – вводы, в которых разряды внутри диэлектрика (без контакта с металлом), (вводы № 4194, № 5175).

В первой группе для обнаружения следов разряда оказалось достаточно произвести механическую разрезку изоляционных остовов в продольном и поперечном направлениях. Следы разрядов определялись визуально по признакам потемнения от зауглероженных продуктов в местах контакта медных поясков с токопроводящим клеевым слоем (рис. 15). Рис. 16. Образцы изоляции (под электронным микроскопом) вводов, в которых разряды были внутри диэлектрика

Во второй группе визуально следы разрядов не обнаруживались. Но в образцах изоляции, вырезанных из разных зон и специально подготовленных для оптической и электронной микроскопии [1], фиксировалось отличие во внутренней структуре. В зоне без ЧР наблюдаются неоднородности (оптические, или поры, или микротрещины) не более 1–3 мкм, в зоне с ЧР – 20 мкм и более, направленных вдоль силовых линий электрического поля (рис. 16).

выводы

1. Диагностический анализ элементарных явлений при ЧР в практических конструкциях с твердой изоляцией достаточно надежен для выявления дефектов, при этом обосновано:

 контроль высоковольтных вводов по характеристикам ЧР при выпуске с завода обеспечивает высокое качество;

 для повышения длительной эксплуатационной надежности твердой изоляции аппаратов необходимо совер-



Рис. 15. След разряда в месте контакта медного пояска с токопроводящим клеевым слоем, обнаруженный при разрезке остова

шенствование методов технического диагностирования.

2. Локация зон ЧР в специальных опытных образцах вводов позволила определить возможности последующего прямого визуального контроля дендрита (дефектного включения) в твердой изоляции, практически показано, что при механическом разрезе (вскрытии) изоляции в зоне дефекта установлено:

 в местах ЧР с контактом с металлом электрода уверенно фиксируются следы потемнения от зауглероженных продуктов разрядов;

при наличии ЧР в монолите диэлектрика, следы разрядов визуально не обнаруживались, следы ЧР фиксировались в специальных опытах по отличию в структуре диэлектрика при электронной микроскопии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Славинский А.З. «Физика диэлектриков». Том 1. «Высоковольтная изоляция энергетической аппаратуры». – М.: ООО Издательство «Научтехлитиздат», 2007. – Стр. 102–106.

2. *W. McDermid, A.Glodjo, J.C. Bromley* (Manitoba Hydro), "Analysis of Winding Failures in HVDC Converter Transformers" EIC/EMCW'99 Expo, Cincinnati, USA, October 26–28, 1999.

3. *Y.P. Aksenov* at all. In Service Turbine Generators Stator Windings Failure Risk minimization On The Base of Discharge Events On-line Monitiring.//EIC 2001 Technical Program Cincinnati Convention Center. – Cincinnati, Ohio USA.

4. Славинский А.З., Монастырский А.Е., Пинталь Ю.С. Контроль высоковольтных вводов с твердой RIP-изоляцией по характеристикам ЧР на заводе «Изолятор» // «Энергоэксперт». 2014. № 4.