

Ф. Р. Исмагилов, Д. В. Максудов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ПРОЦЕССЕ СТАРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКА

Приводится разработанная математическая модель развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика, на основе которой производится интерпретация экспериментальных данных изменения интенсивности частичных разрядов во времени. *Частичные разряды; газовые включения в диэлектрике; анализ и прогнозирование процесса деградации изоляции электротехнических объектов*

Частичные разряды, развивающиеся при старении диэлектрика изоляции в газовых включениях, могут служить средством диагностики состояния изоляции. Принятые и широко распространенные методы, основанные на измерении и фиксации изменений диэлектрических потерь в изоляции, диагностируют ее состояние в целом, однако не в состоянии характеризовать степень развития локальных дефектов, скрытых в толще изоляции.

Вместе с тем данная проблема приобретает особую актуальность ввиду высокой степени износа действующих силовых трансформаторов и генераторов энергосистемы. Определение степени развития возникающих в изоляции локальных дефектов, посредством измерений частичных разрядов, и последующий превентивный ремонт обходятся на порядок дешевле, чем действия, необходимые после пробоя изоляции трансформатора в целом [1, 2].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Механизм развития частичных разрядов имеет следующую природу.

Напряженность электрического поля в газовом включении (полости, образовавшейся в результате старения изоляции), как правило, гораздо выше, чем в окружающем пространстве, заполненном диэлектриком; отношение напряженностей внутри и вне полости обратно пропорционально отношению диэлектрических проницаемостей газа и диэлектрика изоляции

$$E_{\text{в}} = \frac{\epsilon_{\text{д}}}{\epsilon_{\text{в}}} E_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{в}}$ – напряженность электрического поля во включении; $E_{\text{д}}$ – напряженность электрического поля в диэлектрике изоляционного материала, окружающего газовое включение; $\epsilon_{\text{в}}$ – диэлек-

трическая проницаемость газа; $\epsilon_{\text{д}}$ – диэлектрическая проницаемость изоляции, вследствие чего электрическая прочность газового включения меньше прочности окружающей изоляции, что делает вероятным явление пробоя включения. При переменном характере внешнего поля (например, соответствующим промышленной частоте тока, 50 Гц, для условий внутри силовых трансформаторов) на некотором этапе его полупериода напряженность внутри включения (с учетом мультипликатора отношений диэлектрических проницаемостей) достигает пробойного значения, когда электроны газа на пути свободного пробега успевают приобрести энергию, достаточную для ионизации нейтральных атомов. Вследствие этого возникает процесс ударной ионизации и формируется электронная лавина, достигающая противоположной поверхности включения и вызывающая электро-механическую коррозию. Вместе с тем при этом во включении формируется объемный электрический заряд, вектор поля которого направлен противоположно вектору внешнего поля, вследствие чего дальнейшее перемещение зарядов во включении прекращается до тех пор, пока дальнейший рост напряженности внешнего поля на полупериоде не воссоздаст пробойные условия во включении.

Таким образом, частичные разряды повторяются с определенной частотой в течение определенного участка каждого полупериода внешнего поля, когда его напряжение превосходит критическое значение.

Напряженность электрического поля в диэлектрике

$$E_{\text{д}} = U_0 / d,$$

где U_0 – приложенное напряжение, d – толщина диэлектрика (рис. 1). Разность потенциалов в газовом включении в соответствии с (1)

$$U_{\text{в}} = E_{\text{в}} \delta,$$

где δ – размер включения в направлении параллельном вектору силовых линий электрического поля, или же

$$U_B = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_B} \times \frac{\delta}{d} \times U_0. \quad (2)$$

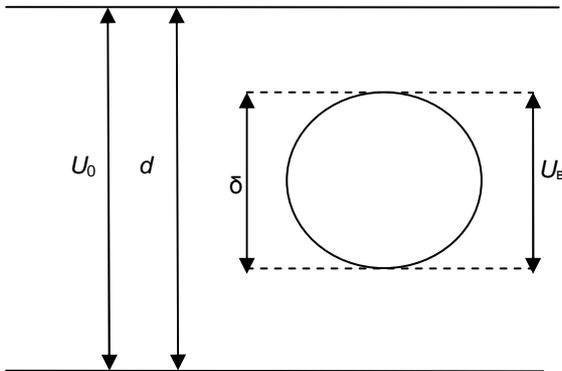


Рис. 1. Газовое включение в диэлектрике

При этом следует отметить, что мультипликатор отношения диэлектрических проницаемостей присутствует в выражении (1) только при условии $\delta \ll d$. Если размеры газового включения становятся соизмеримы с толщиной диэлектрической изоляции, то напряженности полей во включении и в диэлектрике выравниваются, что означает снижение напряженности во включении.

Зависимость напряжения во включении, необходимого для возникновения электрического пробоя и инициации частичных разрядов, от размеров самого включения $U_{впр}(\delta)$ может быть описана законом Пашена, который при атмосферном давлении применим в масштабном диапазоне от микрона до 1 см [3]:

$$U_{впр}(\delta) = \frac{44 \times 10^6 p \delta}{\ln(p\delta) + 12,8}, \quad (3)$$

где p – давление, атм.

Мощность частичных разрядов во включении рассчитывается по формуле

$$P = nC(U_{впр}^2 - U_r^2), \quad (4)$$

где U_r – напряжение во включении, при котором происходит гашение частичных разрядов, n – число частичных разрядов за единицу времени,

$$n = 4f \frac{U_B - U_r}{U_{впр} - U_r}, \quad C - \text{емкость включения,}$$

$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_S}{\delta}$, S – площадь включения в направлении, перпендикулярном направлению вектора электрического поля.

Выражение (4) может быть упрощено при следующих допущениях:

- напряжение гашения намного меньше пробивного $U_r \ll U_{впр}$,
- площадь включения в направлении, перпендикулярном направлению вектора электрического поля, пропорционально квадрату его размеров в параллельном направлении $S \approx \delta^2$.

При этом мощность частичных разрядов во включении

$$P = 4f \frac{U_B}{U_{впр}} \epsilon_0 \epsilon_B \frac{S}{\delta} \times U_{впр}^2 = \quad (5)$$

$$= 4f U_B \epsilon_0 \epsilon_B \delta \times U_{впр}.$$

С учетом формулы (2) для напряжения во включении и формулы (3) для пробивного напряжения, выражение (5) для масштабов в диапазоне $10^{-6} - 10^{-2}$ м при атмосферном давлении может быть переписано в следующем виде

$$P(\delta) = 4f U_B C U_{впр} =$$

$$= 4f \frac{\epsilon_d}{\epsilon_B} \times \frac{\delta}{d} U_0 \epsilon_0 \epsilon_B \frac{S}{\delta} \frac{4,4 \times 10^7 p \delta}{\ln(p\delta) + 12,8}, \quad (6)$$

$$P(\delta) = 4f \frac{\epsilon_d}{\epsilon_B} \times \frac{\delta}{d} U_0 \epsilon_0 \epsilon_B \delta \frac{4,4 \times 10^7 p \delta}{\ln(p\delta) + 12,8}.$$

Таким образом, $P(\delta) \approx \delta^3$.

Произведение всех постоянных величин дает константу

$$\text{const} = 4f \frac{\epsilon_d}{\epsilon_B} \times \frac{1}{d} U_0 \epsilon_0 \epsilon_B \times 4,4 \times 10^7 p,$$

$$\text{const} = 4 \times 10^5 \text{ Вт/м}^3.$$

Окончательное выражение зависимости мощности частичных разрядов от геометрических размеров включения имеет вид

$$P(\delta) = \text{const} \times \left(\frac{\delta^3}{\ln(p\delta) + 12,8} \right). \quad (7)$$

Формула (7) указывает на быстрый рост мощности частичных разрядов во включении с увеличением его геометрических размеров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Эксплуатация исследуемой изоляции электрооборудования моделировалась методом термического старения. Измерение частичных разрядов производилось после каждого цикла старения, соответствующего времени эксплуатации 2000 ч. Толщина изоляции составляла $d = 5$ мм, приложенное напряжение $U_0 = 10$ кВ, все исследованные образцы изоляции имели идентичные

геометрические размеры и химический состав [4]. Усредненный график интенсивности частичных разрядов для всех исследованных образцов изоляции представлен на рис. 2.

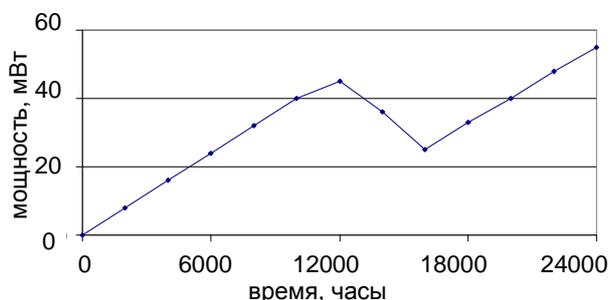


Рис. 2. Интенсивность частичных разрядов

Типичным для кривых зависимости мощности частичных разрядов от времени для всех исследованных образцов является следующее: в течение длительного времени (порядка 12 000 часов) происходит рост интенсивности частичных разрядов с последующим провалом их интенсивности, вслед за которым наступает новый этап роста, продолжающийся вплоть до пробоя изоляции.

В момент пробоя изоляции размер газового включения сопоставим с толщиной изоляции. Как видно из рис. 2, значение мощности частичных разрядов перед спадом их интенсивности менее чем в 1,5 раза уступает их мощности в момент пробоя. Как показывает формула (7), интенсивность частичных разрядов пропорциональна кубу линейных размеров газовых включений в изоляции, и, следовательно, изменение самих указанных размеров от момента начала спада интенсивности до момента пробоя составляет не более 20%. Как указывалось выше, мультипликатор отношений диэлектрических проницаемостей ϵ_d / ϵ_b (составляющий для данного вида изоляции безразмерную величину 3,5) в формуле (6) действует лишь при условии $\delta \ll d$. Между тем, как было показано, размер включений в момент начала спада интенсивности частичных разрядов близок к размеру в момент пробоя и, следовательно, к толщине самой изоляции, что делает невозможным выполнение указанного условия.

ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель развития частичных разрядов в процессе старения изоляции, позволяет, в частности, точно определить зависимость интенсивности разрядов от размеров газовых включений в диэлектрике, а также провести анализ и интерпретацию про-

веденных экспериментальных исследований, обнаруживающих спад интенсивности частичных разрядов перед последующим новым ростом вплоть до момента пробоя.

Показано, что наличие спада интенсивности частичных разрядов свидетельствует о том, что размеры включений уже соизмеримы с толщиной изоляции, что является сигнализатором перехода процесса деградации диэлектрика в предпробойную стадию.

Указанная математическая модель и возможная на ее основе интерпретация экспериментальных данных позволяют прогнозировать остаточный срок службы диэлектрика по анализу периодических замеров интенсивности частичных разрядов. Это в свою очередь делает возможным продление срока службы электротехнического оборудования путем проведения превентивных мероприятий, предотвращающих его выход из строя, что является весьма актуальным в условиях высокой степени износа объектов электроэнергетики (трансформаторов, генераторов и т. д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Диэлектрики в электрическом поле. Уфа: УГАТУ, 2009. 104 с.
2. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Разрядные процессы в диэлектриках в электрических и магнитных полях. М.: Машиностроение, 2010. 180 с.
3. ГОСТ 1516.2–97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. Межгосударственный стандарт. М.: Изд-во стандартов, 1998. Переиздание, 2004. 31 с.
4. Федосов Е. М. Частичные разряды в элементах электротехнических комплексов: дис. ... канд. техн. наук / Уфимский государственный авиационный технический университет. Уфа, 2009.

ОБ АВТОРАХ

Исмагилов Флюр Рашитович, проф., зав. каф. электромеханики, проректор УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. электромеханических преобразователь энергии.

Максудов Денис Вилевич, доц. той же каф. Дипл. физик (Башкирск. гос. ун-т, 1999). Канд. техн. наук по электротехническим комплексам и системам (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. взаимодействия диэлектриков с электрическими полями.