

Глава вторая

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Рассматриваются характеристики изоляционных конструкций, определяемые процессами в диэлектриках - проводимостью и поляризацией [4-6].

Электропроводность технических диэлектриков определяется наличием в них свободных ионов и характеризуется удельным объемным сопротивлением ρ_v . При приложении к изоляционной конструкции напряжения через нее протекает ток проводимости. Состояние изоляции характеризуется значением этого тока или обратной ему величиной - сопротивлением изоляции. Процесс поляризации возникает в диэлектрике при помещении его в электрическом поле. При этом на поверхности диэлектрика и в его объеме образуются связанные электрические заряды, изменяющие поле внутри вещества.

Одной из важнейших характеристик изоляции является диэлектрическая проницаемость, которая определяется степенью поляризации диэлектрика. Для изоляционной конструкции вместо диэлектрической проницаемости ϵ удобнее рассматривать пропорциональную ей емкость между электродами C .

При поляризации происходит перемещение электрических зарядов, на это затрачивается энергия поля. Некоторые процессы поляризации сопровождаются рассеиванием части этой энергии в объеме диэлектрика, т. е. диэлектрическими потерями. Диэлектрические потери и особенно их изменение характеризуют состояние диэлектрика.

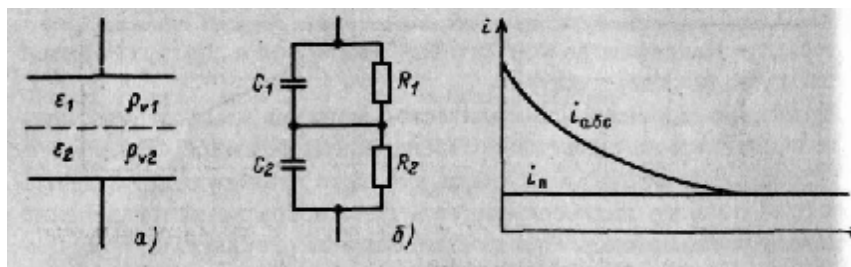


Рис. 2.1. Конденсатор с двухслойной изоляцией:

а — конденсатор; б — схема замещения

Рис. 2.2. Изменение во времени тока через неоднородную изоляцию:

i_{abc} — ток абсорбции; i_n — ток проводимости

Известны несколько видов поляризации: электронная, ионная, дипольная, междуслойная (миграционная) и ряд других. Виды поляризации различаются по времени, необходимому для ее установления, которое иногда называют временем релаксации диэлектрика. К быстрым видам поляризации относятся электронная, ионная и дипольная, которые завершаются за очень малое время ($10^{-10} \dots 10^{-15}$ с).

Междуслойная поляризация, относящаяся к медленным видам поляризации, может иметь время релаксации, соизмеримое с периодом промышленной частоты или даже значительно превышающее его. Междуслойная поляризация характерна для изоляционных конструкций высокого напряжения, в которых, как правило, используются диэлектрики с разными характеристиками. При междуслойной поляризации на поверхности раздела слоев разнородных диэлектриков происходит накопление свободных зарядов, называемых зарядами абсорбции. Перемещение этих зарядов создает ток абсорбции.

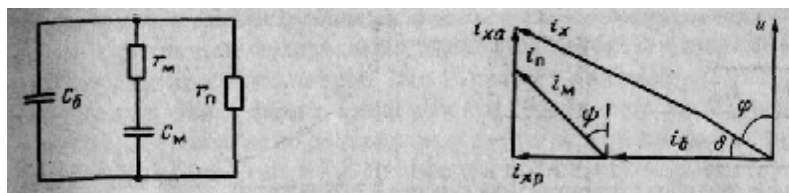


Рис. 2.3. Упрощенная схема замещения конденсатора с диэлектриком, имеющим потери

Рис. 2.4. Векторная диаграмма тока через диэлектрик с потерями

Рассмотрим конденсатор (рис. 2.1) с двухслойной изоляцией: характеристики диэлектрика первого слоя — ρ_{01} и ϵ_1 , а второго — ρ_{02} и ϵ_2 . Условие неоднородности изоляции $\epsilon_1 \rho_{01} \neq \epsilon_2 \rho_{02}$ или $\epsilon_1 \rho_{01} > \epsilon_2 \rho_{02}$ переходя к характеристикам схемы замещения, $C_1 R_1 \neq C_2 R_2$. При подключении такого конденсатора к достаточно мощному источнику постоянного напряжения происходит заряд его емкости, причем напряжение по слоям изоляции распределяется в соответствии с их емкостями. Затем происходит перераспределение зарядов, ибо конечное распределение напряжения по слоям определяется их сопротивлениями. При этом на границе раздела слоев накапливается заряд абсорбции.

Переходный процесс сопровождается протеканием тока абсорбции (рис. 2.2). В рассматриваемом случае ток абсорбции изменяется по экспоненциальному закону, постоянная времени его определяется процессом междуслойной поляризации. Реально в изоляции число неоднородных слоев больше двух, и ток абсорбции представляет собой сумму токов с различными амплитудами и постоянными времени.

В момент включения к источнику постоянного напряжения U на электродах конденсатора появляется заряд $q_0 = C_0 U$. Емкость C_0 называется безынерционной (геометрической) и состоит из суммы емкости вакуумного конденсатора, имеющего аналогичные электроды, и емкости, определяемой процессами быстрых видов поляризации, которые устанавливаются практически безынерционно.

По мере развития медленных процессов поляризации заряд на электродах конденсатора будет увеличиваться до значения $q = q_0 + q_m = (C_0 + C_m) U$, где C_m - емкость, определяемая процессами медленной поляризации (абсорбционная емкость).

Упрощенная схема замещения для описанного процесса приведена на рис. 2.3. Постоянная времени $\tau = r_m C_m$ цепи, моделирующей медленную поляризацию, должна быть равна постоянной времени установления этого процесса. Сопротивление r_m определяет значение тока проводимости. Строго говоря, каждому виду поляризации должна соответствовать своя цепочка r_m и C_m , однако, учитывая, что в реальных конструкциях преобладает один вид медленной поляризации - междуслойная, для качественного рассмотрения можно ограничиться схемой замещения.

Интенсивность и длительность абсорбционных процессов в изоляционной конструкции определяются диэлектрическими характеристиками неоднородных слоев. Дефекты изоляции, изменяющие степень неоднородности изоляции (увлажнение, расслоение), изменяют ход процесса междуслойной поляризации и, следовательно, характеристики тока абсорбции. Поэтому абсорбционные характеристики изоляции могут быть использованы в качестве диагностических. Контролируемые параметры — ток абсорбции и абсорбционная емкость.

Скорость изменения тока абсорбции зависит от соотношения параметров неповрежденной и поврежденной частей изоляции. Измеряя ток абсорбции в заданные моменты времени, можно получить данные, характеризующие определенные виды дефектов.

Один из наиболее часто применяемых диагностических параметров - коэффициент абсорбции, определяемый как отношение результатов измерения сопротивления изоляции, проведенных через 60 и 15 с после начала измерения, т. е.

$$K_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{abc\ 15} + i_{\pi}}{i_{abc\ 60} + i_{\pi}} \approx \frac{i_{abc\ 15}}{i_{abc\ 60}}$$

Предложен еще один параметр, основанный на учете изменения тока абсорбции, - коэффициент состояния:

$$K_c = \frac{d i_{абс} / dt}{q_б},$$

где $q_б$ - заряд геометрической емкости объекта.

Скорость изменения тока абсорбции следует определять через 0,1 с после начала его протекания [7]. Практически скорость изменения тока определяется по результатам двукратного измерения его через небольшой промежуток времени после заколачивания предварительно заряженного объекта. Отнесение скорости изменения тока к заряду упрощает нормирование, исключая влияние емкости объекта I напряжения измерительной установки.

Емкостные методы измерений основаны на определении зависимости абсорбционной емкости объекта от времени и ряда других факторов (частоты, температуры). Производится интегрирование тока абсорбции в течение заданного промежутка времени. Полученное таким образом значение заряда, пропорциональное соответствующему значению абсорбционной емкости, относится к значению, соответствующему геометрической емкости. Диагностические параметры: $\Delta C / C_{50}$ и $(C_2 - C_{50}) / C_{50}$, где ΔC - изменение емкости, вызванное абсорбционными процессами (абсорбционная емкость), C_{50} - геометрическая емкость (значение, соответствующее измеренному при частоте 50 Гц).

Применяется еще один параметр - дисперсия, определяемый как отношение геометрической емкости $C_б$ к абсорбционной $C_м$:

$$D = C_б / C_м.$$

При переменном напряжении ток i_x в цепи эквивалентного конденсатора (см. рис. 2.3) содержит следующие составляющие: практически безынерционный ток смещения $i_б$, связанный с протеканием заряда $q_б$ и состоящий из тока смещения в вакууме и тока смещения, определяемого процессами быстрой поляризации; релаксационный ток смещения $i_м$, связанный с протеканием заряда $q_м$ и определяемый процессами медленной поляризации; ток сквозной проводимости $i_п$, определяемый сопротивлением изоляции (рис. 2.4).

В рассматриваемых изоляционных конструкциях высокого напряжения, где преобладают процессы междуслойной поляризации, ток $i_м$ является абсорбционным током.

Виды медленной поляризации, время установления которых сопоставимо с периодом приложенного напряжения или больше его, не успевают развиться полностью. Это вызывает уменьшение поляризации, находящейся в фазе с вектором напряженности поля внешнего источника, и появление составляющей, отстающей по фазе от напряженности поля на угол $\pi / 2$. Первое обстоятельство приводит к снижению емкости, а второе вызывает потери энергии.

Вследствие запаздывания медленной поляризации ток $i_м$, связанный с ее изменением, будет опережать напряжение по фазе не на угол $\pi / 2$, а только на угол φ . Реактивную составляющую суммарного тока i_{xp} образуют ток быстрых видов поляризации $i_б$ и находящаяся с ним в фазе составляющая тока медленной поляризации $i_м$. Активную составляющую суммарного тока i_{xa} образуют ток сквозной проводимости i_n и находящаяся с ним в фазе составляющая тока $i_м$. Из-за наличия активной составляющей тока, вызванной потерями, ток i_x опережает по фазе приложенное напряжение на угол, меньший чем $\pi / 2$.

Диэлектрическими потерями называется суммарная мощность $P_д$, рассеиваемая в диэлектрике при приложении к нему переменного напряжения,

$$P_к = U I_x \cos \psi$$

или же с учетом рис. 2.4

$$P_д = U I_{xa} = U I_{xp} \operatorname{tg} \delta,$$

где U и I_x - действующие значения напряжения и тока. Угол δ , дополняющий угол φ до $\pi/2$, называется углом диэлектрических потерь.

Мощность потерь зависит не только от характеристик диэлектрика и частоты приложенного к нему напряжения, но и от объема изоляции. Поэтому для оценки состояния изоляции обычно используется тангенс угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_{\text{д}}}{U I_{\text{р}}} = \frac{I_{\text{а}}}{I_{\text{р}}} \quad (2.1)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь почти не зависит от размеров изоляционной конструкции, так как при их изменении пропорционально изменяются активная и реактивная составляющие тока, протекающего через диэлектрик.

В практике значение $\operatorname{tg} \delta$ выражается иногда в процентах $\operatorname{tg} \delta \% = 100 \operatorname{tg} \delta$.

Упрощенную схему замещения конденсатора с потерями можно построить исходя из равенства диэлектрических потерь в реальном конденсаторе и его эквивалентной схеме. Применяются две схемы замещения: параллельная (рис. 2.5, а) и последовательная (рис. 2.5,б).

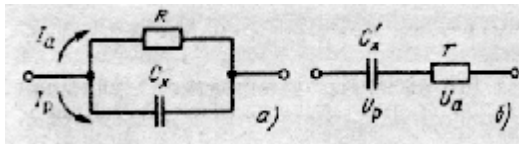


Рис. 2.5. Схемы замещения конденсатора с потерями

Для параллельной схемы

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{а}} &= U/R; \\ I_{\text{р}} &= \omega C_x U; \\ \operatorname{tg} \delta &= I_{\text{а}}/I_{\text{р}} = 1/(\omega C_x R); \\ P_{\text{д}} &= \omega C_x U^2 \operatorname{tg} \delta. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Для последовательной схемы

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{а}} &= I_x r; \\ U_{\text{р}} &= I_x / (\omega C_x'); \\ \operatorname{tg} \delta &= U_{\text{а}}/U_{\text{р}} = \omega C_x' r; \\ P_{\text{д}} &= I_x^2 r = \frac{\omega C_x' U^2 \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Приравняв выражения для $P_{\text{д}}$ и $\operatorname{tg} \delta$ в разных схемах замещения получим

$$C_x = \frac{C_x'}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \text{ и } R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right).$$

Поскольку обычно $\operatorname{tg}^2 \delta \ll 1$, то $C_x = C_x'$, а $R \gg r$.

Ни одна из рассмотренных схем замещения не отражает полностью все процессы, происходящие в диэлектрике; схему выбирают исходя из цепей проводимых расчетов.

Для измерения и расчета диэлектрических характеристик изоляции высокого напряжения лучше использовать параллельную схему замещения, хотя ввиду малости угла δ вполне пригодна и последовательная схема.

Для оценки связи диэлектрических потерь изоляции с ее состоянием используем схему замещения рис. 2.3. Для этой схемы емкость C_x и $\operatorname{tg} \delta$ на переменном токе с частотой ω (влиянием сопротивления проводимости r_n пренебрегаем):

$$C_x = C_0 + \frac{C_M}{1 + \omega^2 \tau_M^2};$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega \tau_M C_M}{C_0 (1 + \omega^2 \tau_M^2) + C_M}.$$

Емкость и $\operatorname{tg} \delta$ изоляции зависят как от абсорбционной составляющей емкости, и от времени релаксации. При изменении частоты и или постоянной τ_n значение $\operatorname{tg} \delta$ проходит через максимум. Обычно этот максимум имеет место в областях инфранизких частот.

Увеличение степени увлажнения приводит к росту C_m что вызывает рост $\operatorname{tg} \delta$. С ростом температуры значение τ_m уменьшается, что вызывает увеличение $\operatorname{tg} \delta$ (максимум $\operatorname{tg} \delta$ сдвигается в область промышленной частоты). Одновременно растут и потери от тока проводимости, не учтенные нами в расчете.

В реальном объекте, где применены различные диэлектрики, одновременно протекают процессы, вызванные всей совокупностью причин. Поэтому указанные выше простые зависимости проявляются совместно, усложняя картину явления. Однако основные закономерности (рост $\operatorname{tg} \delta$ с повышением температуры или степени увлажнения) остаются. Зависимость потерь от температуры и увлажнения для разных изоляционных конструкций неодинакова.

Величина $\operatorname{tg} \delta$ дает усредненную объемную характеристику состояния диэлектрика, поскольку активная составляющая тока, вызванная диэлектрическими потерями в местном дефекте, при измерении относится к общему емкостному току объекта. Как правило, измерение $\operatorname{tg} \delta$ позволяет обнаружить общее (т. е. охватывающее большую часть объема) ухудшение изоляции. Местные дефекты, т. е. дефекты, охватившие сравнительно небольшую часть объема диэлектрика, а также сосредоточенные дефекты плохо обнаруживаются измерением $\operatorname{tg} \delta$, причем тем хуже, чем больше объем изоляции объекта.

Изменение емкости изоляции, кроме информации об изменении структуры диэлектрика, вызвавшем изменение процессов поляризации (абсорбции), позволяет обнаружить и местные грубые дефекты (пробой части изоляции). Степень выявляемости дефектов также зависит от соотношения между объемами поврежденной и неповрежденной частей изоляции.

Если зона изоляции, имеющей дефект, включена параллельно остальной части изоляции, то из равенства общих потерь и суммы потерь в рассматриваемых зонах следует

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_D \operatorname{tg} \delta_D + C_O \operatorname{tg} \delta_O}{C_D + C_O} = \frac{C_D \operatorname{tg} \delta_D + C_O \operatorname{tg} \delta_O}{C_x},$$

где C_D и $\operatorname{tg} \delta_D$ - характеристики зоны с дефектом; C_O и $\operatorname{tg} \delta_O$ - характеристики остальной части изоляции.

Для ориентировки можно принять, что емкость зоны изоляции пропорциональна занимаемому ею объему. Для местного дефекта $V_D \ll V_O \approx V$. Поэтому измеренное значение

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{V_D}{V} \operatorname{tg} \delta_D + \operatorname{tg} \delta_O. \quad (2.4)$$

Аналогичное соотношение может быть получено и для случая последовательного расположения зон. Из (2.4) следует, что даже значительное увеличение потерь в небольшом объеме изоляции дает малое приращение значения $\operatorname{tg} \delta$ объекта.

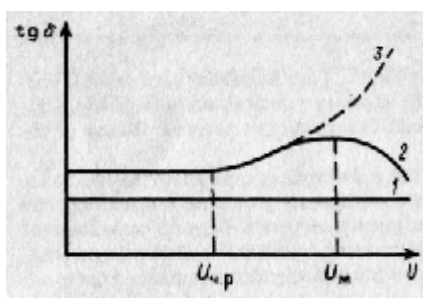


Рис. 2.6. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения:
1 — при отсутствии частичных разрядов;
2 и 3 — при частичных разрядах в изоляции.

Тангенс угла диэлектрических потерь от напряжения практически не зависит. Однако это справедливо лишь при отсутствии частичных разрядов в изоляции; при наличии разрядов появляется зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения (рис. 2.6).

Диэлектрические потери зависят от квадрата напряжения: $P_D = k_1 U^2$; потери, связанные с частичными разрядами, $P_{ч.р.} = k_2 (U - U_{ч.р.})$, следовательно,

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{k_1 U^2 + k_2 (U - U_{ч.р.})}{\omega C_x U^2}.$$

Полученная зависимость имеет максимум при $U_M = 2 U_{ч.р.}$. В практике встречаются

случаи, когда из-за развития дефекта при росте приложенного напряжения интенсивность разрядов увеличивается вплоть до пробоя (кривая 3). Возможно также более резкое снижение потерь, чем показано на рис. 2.6. Это происходит при затухании процесса разрядов, вызванном увеличением проводимости поверхности включения.