

Глава девятая

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В КОНДЕНСАТОРЕ

9.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Частичные разряды (ЧР) в силовых конденсаторах являются одним из основных факторов, разрушающих электрическую изоляцию при работе на переменном и импульсном напряжениях.

ЧР представляет собой электрический разряд, частично шунтирующий изоляцию между электродами [9.1—9.3]. Эти разряды могут возникать в ограниченной области диэлектрика с пониженной электрической прочностью или повышенной напряженностью электрического поля как в прилегающих, так и в не прилегающих к обкладке объемах изоляции. Область диэлектрика, в которой возникает ЧР, обычно называется включением; примерами таких включений могут быть газовое включение, прослойка пропитывающей жидкости между листами твердого диэлектрика или между листом и обкладкой.

Под воздействием ЧР происходит постепенное разрушение диэлектрика, причем характер и степень разрушения зависят от интенсивности ЧР, от свойств и вида изоляции. Разрушения связаны с разрывом молекулярных связей и образованием радикалов; возможен и обратный процесс: укрупнение молекул или присоединение радикалов. Эти явления связаны с выделением водорода или других газов: метана, ацетилена, углекислого газа и др.; возможно образование углеродистых соединений.

В изоляции конденсаторов наиболее интенсивно разрушается жидкий диэлектрик, что проявляется в изменении физико-химических характеристик, сопровождается выделением газа, увеличением $\text{tg}\delta$ и проводимости. В последующем возникают разрушения твердой фазы, которые при интенсивном протекании завершаются пробоем изоляции.

Наиболее опасными являются газообразные продукты. При скорости газообразования, превосходящей скорость поглощения газов окружающей жидкостью за счет возможного химического связывания и растворения, а также при насыщении жидкости газом, в конденсаторном диэлектрике может образовываться концентрированная газовая фаза в виде газовых включений. Напряженность поля в таком включении, имеющем $\epsilon_r = 1$, будет наибольшей по сравнению с другими компонентами диэлектрика, и интенсивность ЧР в нем значительно возрастает, что ускоряет разрушение изоляции в этой точке за счет эрозии твердой фазы. Таким образом, возникновение и развитие ЧР в конденсаторном диэлектрике во многом определяются напряженностью поля в жидком диэлектрике и свойствами пропитывающей жидкости.

В начале развития конденсаторостроения, когда технология термовакuumной обработки диэлектрика и пропитывающей жидкости была далеко не совершенна, в диэлектрике могли образовываться газовые включения — пузырьки — из остаточных растворенных газов, являвшиеся источником возникновения и развития ЧР.

В конденсаторах, пропитанных жидким диэлектриком, при современной технологии изготовления изоляция не содержит

газовых включений. В этом случае ЧР возникают прежде всего в прослойках жидкого диэлектрика, так как электрическая прочность жидкости значительно меньше, чем прочность твердой изоляции (конденсаторной бумаги или полимерной пленки).

Наименьшее значение напряженности поля во включении $E_{в.з}$ приводящее к пробое включение, называется напряженностью возникновения или зажигания ЧР. При пробое включения, емкость которого обозначим через $C_{в}$, ионы, образующиеся в процессе разряда, заряжают поверхность включения и создают поле, обратное по направлению основному (внешнему) полю. Как правило, плотность тока разряда, возникающего после пробоя емкости $C_{в}$, недостаточна для его поддержания, и он гаснет. Наибольшее значение напряженности $E_{гн} < E_{в.з}$ при которой возникший разряд прекращается или гаснет, называется напряженностью погасания ЧР. Она лежит в пределах от 10 до 90% напряженности зажигания.

Эквивалентная схема конденсаторного диэлектрика с «плоским» включением, расположенным перпендикулярно силовым линиям поля, показана на рис. 9.1. Общая емкость C_x составляется из трех емкостей: емкости включения $C_{в}$, емкости $C_{д}$, включенной последовательно с $C_{в}$, и емкости $C_{а}$ образуемой оставшейся частью диэлектрика, в которой предполагается отсутствие включений:

$$C_x = C_a + C_{в} C_{д} / (C_{в} + C_{д}). \quad (9.1)$$

Используем обозначения рис. 9.1 для напряженности поля во включении:

$$E_{в} = \frac{E}{\epsilon_{rn} / \epsilon_{rd} + d_n (\epsilon_{rd} - \epsilon_{rn}) / d \epsilon_{rd}}, \quad (9.2)$$

где $\epsilon_{гд}$ — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $\epsilon_{гв}$ — то же включения; $E = U/d$ — расчетная напряженность поля в диэлектрике; U — приложенное напряжение.

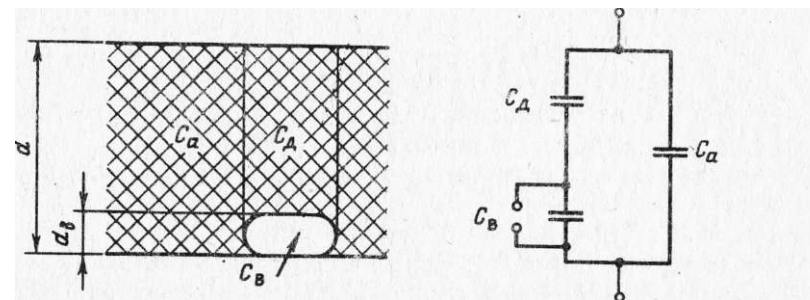


Рис. 9.1. Схема замещения диэлектрика при ЧР

Обозначим через $U_{ч.р}$ приложенное к обкладкам конденсатора напряжение, при котором во включении возникает ЧР. Связь между $U_{ч.р}$ и напряжением на включении $U_{в.з}$ соответствующем возникновению ЧР, находится из эквивалентной схемы рис. 9.1:

$$U_{ч.р} = U_{в.з} (C_в + C_д) / C_д. \quad (9.3)$$

При пробое включения (возникновении ЧР) через него пройдет заряд q , и напряжение на включении изменится на $\Delta U_в = U_{в.з} - U_{в.н}$ где $U_{в.з}$ — напряжение зажигания и $U_{в.н}$ — напряжение погасания ЧР.

Учитывая, что емкости $C_в$ и $C_д$ намного меньше емкости $C_а$, находим заряд, проходящий через включение:

$$q = (C_в + C_д) (U_{в.з} - U_{в.н}) = (C_в + C_д) \Delta U_в \quad (9.4)$$

который обусловлен процессами в диэлектрике и практически не может быть измерен.

Изменение напряжения на обкладках ΔU_x можно выразить через изменение некоторого фиктивного заряда $q_{ч.р}$, называемого кажущимся зарядом ЧР, в вид

$$\Delta U_x = q_{ч.р} / C_x. \quad (9.5)$$

Если кажущийся заряд $q_{ч.р}$ мгновенно внести между обкладками, то он вызовет такое же изменение напряжения на них, как и реальный ЧР. Практически значения $q_{ч.р}$ невелики (порядка 10^{-12} Кл и менее), и вызываемые ими изменения напряжения на обкладках конденсатора незначительны. При $q_{ч.р} = 10^{-12}$ Кл и $C_x = 1000$ пФ $\Delta U_x = 10^{-3}$ В. С увеличением C_x значение ΔU_x уменьшается. Напряжение на обкладках конденсатора в дальнейшем восстанавливается за счет подтекания зарядов от источника напряжения и других емкостей. Это приводит к возникновению высокочастотных колебаний в схеме, регистрация которых специальными измерительными устройствами позволяет исследовать характеристики ЧР.

Связь между $q_{ч.р}$ и q находится из следующих соображений. После возникновения ЧР и уменьшения напряжения на емкости $C_в$ на $\Delta U_в$ из емкости $C_а$ ушел заряд на подзарядку емкости $C_д$, равный кажущемуся заряду ЧР $q_{ч.р}$ и вызвавший уменьшение напряжения на ΔU_x , т. е.

Определяя из (9.4) $\Delta U_в$ и подставляя его в (9.6), получаем

Кажущийся заряд $q_{ч.р}$ характеризует интенсивность единичного ЧР. Для оценки интенсивности ЧР за интервал времени, значительно больший времени между двумя единичными ЧР, используются частота следования ЧР $n_{чр}$, средний ток $I_{чр}$,

средняя мощность $P_{чр}$ и квадратичный параметр $D_{чр}$. Частота следования представляет среднее число импульсов ЧР в единицу времени. Средний ток $I_{чр}$ представляет сумму абсолютных значений $q_{ч.р}$ за время t , деленную на этот интервал времени. Если все заряды одинаковы, то

Средняя мощность $P_{чр}$ представляет среднее значение мощности, подводимой к конденсатору для компенсации мощности, выделяемой в нем во время ЧР. Квадратичный параметр представляет сумму квадратов $q_{ч.р}$ за время t , деленную на этот интервал времени.

Выделяемая при ЧР энергия расходуется частично на нагревание диэлектрика, частично на его разрушение. При условии, что $C_а \gg C_д$, энергия единичного разряда может быть определена как разность начальной $W_з$ и конечной $W_п$ энергий, запасаемых в емкостях эквивалентной схемы рис. 9.1:

$$W_{ч.р} = W_з - W_п = \frac{C_а + C_в}{2} (U_{в.з}^2 - U_{в.п}^2). \quad (9.9)$$

При $U_{в.з} \approx U_{в.н}$ с учетом (9.3) и (9.4) получим

$$W_{ч.р} = q_{ч.р} U_{ч.р}. \quad (9.10)$$

При $U_{в.н} \ll U_{в.з}$

$$W_{ч.р} = q_{ч.р} U_{ч.р} / 2. \quad (9.10a)$$

Если все ЧР имеют одинаковую энергию, то мощность ЧР равна:

$$P_{чр} = n_{чр} W_{чр} = n_{чр} \frac{C_а + C_в}{2} (U_{в.з}^2 - U_{в.п}^2). \quad (9.11)$$

При постепенном подъеме напряжения на конденсаторе интенсивность ЧР в его диэлектрике изменяется. Вначале, когда напряжение на конденсаторе сравнительно невелико, в нем появляются ЧР слабой интенсивности — порядка 10^{-14} — 10^{-12} Кл, называемые начальными ЧР. При длительном воздействии такого напряжения начальные ЧР могут на некоторое время исчезать, затем появляются вновь. Длительное существование начальных ЧР вызывает медленное разрушение диэлектрика, рост $\text{tg} \delta$ и определяет ресурс конденсатора. При дальнейшем подъеме напряжения интенсивность ЧР резко возрастает до 10^{-10} — 10^{-9} Кл, и диэлектрик начинает быстро (в течение дней или часов) разрушаться. Такие ЧР называются критическими. Наименьшее напряжение $U_н$, при котором появляются начальные ЧР, называется напряжением начальных ЧР. Наименьшее напряжение $U_{кр}$, при котором появляются критические ЧР, называется напряжением критических ЧР.

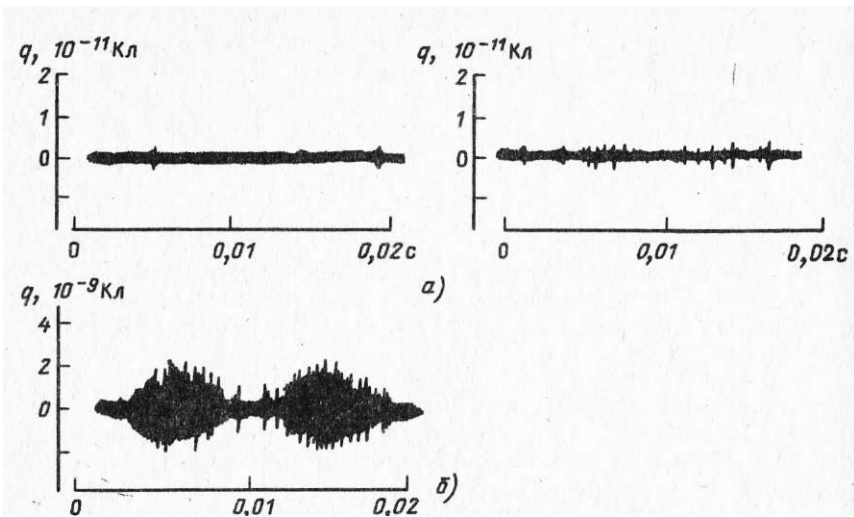


Рис. 9.2. Характерные осциллограммы ЧР при переменном напряжении: а—начальные ЧР; б—критические ЧР

Характерные осциллограммы начальных и критических ЧР приведены на рис. 9.2.

9.2. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ НА ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Если к конденсатору, в диэлектрике которого содержится включение (см. рис. 9.1), прикладывается синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то амплитуда напряжения на включении

$$U_{в.м} = U_m \frac{C_d}{C_d + C_n} = U \eta, \quad (9.12)$$

Такой же зависимостью связаны с соответствующими значениями приложенного напряжения и другие напряжения на включении: зажигания ЧР, их погасания и т. д. Напряжение на включении до возникновения ЧР изменяется по тому же закону, что и приложенное к конденсатору, т. е. $u_e = U_{эм} \sin \omega t$. По достижении напряжения зажигания ЧР $U_{э.з}$ что соответствует значению приложенного к конденсатору напряжения $U_3 = U_{э.з} / \eta$, в нем возникает разряд и напряжение на включении падает до значения напряжения погасания $U_{э.п}$ что соответствует значению приложенного напряжения $U_n = U_{э.п} / \eta$ (рис. 9.3). После того как разряд во включении погас, напряже-

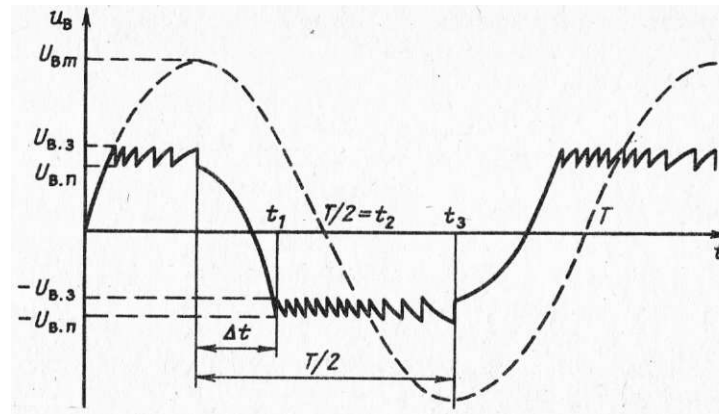


Рис. 9.3. Развитие во времени ЧР при синусоидальном напряжении

ние на нем снова начинает расти по закону изменения приложенного напряжения до значения $U_{э.з}$, после чего наступает повторный разряд, и напряжение на включении снова падает до $U_{э.п}$ и т. д. Время, через которое происходит повторение разрядов, определяется изменением напряжения на включении на $\Delta U_e = U_{э.з} - U_{э.п}$, чему соответствует изменение приложенного напряжения $\Delta U = \Delta U_e / \eta$. При прохождении приложенного напряжения через максимум, напряжение на включении находится между $U_{э.з}$ и $U_{э.п}$. После прохождения максимума напряжение на включении уменьшается до нуля в соответствии с законом изменения приложенного напряжения и далее снова возрастает до $-U_{э.з}$, и весь процесс повторяется, как и при положительном полупериоде. Пробивное напряжение включения можно принять одинаковым для обоих полярностей.

Изменение напряжения на включении после перехода через максимум до возникновения последующих ЧР составляет $U_{э.з} + U_{э.п}$ чему соответствует изменение приложенного напряжения

Найдем число ЧР в одном включении за один полупериод:

$$m_{чр} = \frac{2U_{в.м} - (U_{в.з} + U_{в.п})}{U_{в.з} - U_{в.п}} + 1 = \frac{2(U_{в.м} - U_{в.п})}{U_{в.з} - U_{в.п}}. \quad (9.15)$$

Из (9.15) следует, что $m_{чр}$ зависит от соотношения между $U_{э.з}$ и $U_{э.п}$ или, что то же самое, между U_3 и U_n . Число ЧР во включении за 1 с

$$n_{чр} = 2f m_{чр}, \quad (9.16)$$

где f —частота приложенного напряжения.

Мощность, выделяемая в одном включении при ЧР, находится подстановкой значения $n_{чр}$ из (9.16) в (9.11). После преобразований найдем

$$P_{чр} = 2f(C_0 + C_0)(U_{Вм} - U_{,ен}) (U_{в.з} + U_{в.н}). \quad (9.17)$$

Мощность в единичном включении, выделяемая при ЧР,

$$P_{чр} = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{m_{чр}} q_{чрi} u_i, \quad (9.18)$$

где u_i —мгновенное значение напряжения на диэлектрике в момент времени разряда с кажущимся зарядом $q_{чрi}$; T —период приложенного напряжения.

При пользовании формулой (9.18) необходимо учитывать знаки при $q_{чрi}$ и u_i .

При повышении прикладываемого напряжения разброс напряжения зажигания ЧР во включении, а также увеличение числа мест возникновения ЧР (включений) имеют стохастическую природу и подчинены статистическим закономерностям. Для их описания может быть использован нормальный закон распределения. Учет этих обстоятельств приводит к существенно отличным от формулы (9.17) зависимостям мощности ЧР напряжения или напряженности, имеющим вид

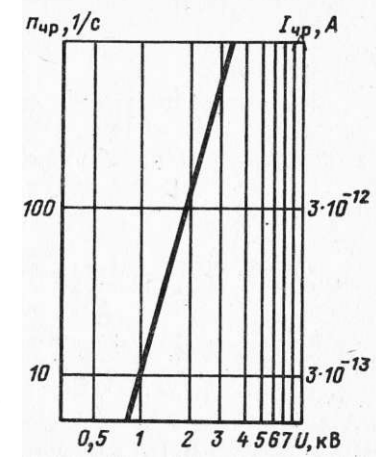
где показатель степени a находится в пределах от 4 до 8, а в среднем $a \approx 6$ и $A = \text{const}$.

Зависимости, аналогичные (9.19), получены экспериментально [9.4]. Характерные зависимости $I_{чр}$ и $n_{чр}$ от напряжения приведены на рис. 9.4.

В диэлектрике, пропитывающая жидкость которого выделяет значительное количество газообразных продуктов при разложении в электрическом поле, как, например, нефтяное масло, в результате действия ЧР могут образовываться концентрированные газовые включения (газовые пузырьки), вследствие чего напряжение возникновения ЧР резко снижается.

Рассмотрим особенности развития ЧР в изоляции, пропитанной нефтяным конденсаторным маслом. При наличии ЧР в изоляции возникает разложение жидкого диэлектрика с образованием газообразных продуктов. Одновременно происходит непрерывное поглощение образующихся газов как за счет растворения газа в жидком диэлектрике, так и за счет химического связывания газа (в основном водорода). Последнее наиболее сильно сказывается в жидкостях, в составе которых имеются непредельный углеводороды. Когда интенсивность газовыделения (газовыделение в единицу времени) превосходит интенсивность поглощения газов, возникают условия для образования газовых пузырьков. Вследствие пробоев, проис-

Рис. 9.4. Зависимость $n_{чр}$ и тока ЧР $I_{чр}$ от напряжения на образце толщиной 80 мкм



ходящих в этих пузырьках, происходит резкое возрастание интенсивности ЧР на 2—3 порядка (возникновение критических ЧР), что приводит к дальнейшему росту этих пузырьков и существенному понижению напряжения возникновения ЧР [9.5].

Предельная растворимость газа в жидком диэлектрике (см. § 6.2)

$$C_r = V_r / V_{ж}, \quad (9.20)$$

где V_r —объем газа, приведенный к нормальным условиям; $V_{ж}$ —объем жидкого диэлектрика. Предельная растворимость различных газов в нефтяном масле приведена в § 6.4.

Количество газа, растворенного в единицу времени, может быть определено из (6.8):

$$v_t = \frac{dV}{dt} = \beta(V_0 - V_t), \quad (9.21)$$

где V_0 — максимальное количество газов, которое может быть поглощено данным объемом жидкого диэлектрика; V_t —количество газов, уже поглощенных к моменту времени t ; β —коэффициент, характеризующий скорость газопоглощения.

Например, для водорода в нефтяном масле

$$V_0 = C_r V_{ж} = 0,04 V_{ж} \frac{p}{10^5},$$

где p —давление окружающей среды, Па.

Количество газов, выделяемое в секунду в процессе развития ЧР, пропорционально мощности ЧР:

где B —удельное количество газов, выделяющихся при разложении жидкого диэлектрика ЧР с энергией 1 Дж.

Критические ЧР возникают при условии

$$v_{чр} > v_r. \quad (9.24)$$

В области критических ЧР количество поглощенных газов определяется только растворяющей способностью жидкого диэлектрика:

$$V_t = \int_0^t v_t dt = V_0 (1 - e^{-\beta t}) \quad (9.25)$$

и

В режиме критических ЧР в бумажно-масляной изоляции снижение напряжения ЧР до минимального значения происходит за время, исчисляемое долями секунд или секундами. При таких временах

$$e^{-\beta t} \approx 1 \quad \text{и} \quad \nu \approx \beta V_0, \quad (9.27)$$

при этом условие возникновения критических ЧР имеет вид

В области начальных ЧР все выделяющиеся при ЧР газы поглощаются маслом, т. е.

Из последнего выражения следует, что в режиме начальных ЧР в герметичном объеме имеет место непрерывное уменьшение величины ν . Поэтому должен наступить момент, когда будет выполнено условие (9.24), и режим начальных ЧР перейдет в режим критических. Время, необходимое для такого перехода $t_{кр}$, находится из совместного решения (9.24) и (9.29):

$$\nu_{чр} = \beta(V_0 - \nu_{чр} t_{кр}),$$

откуда

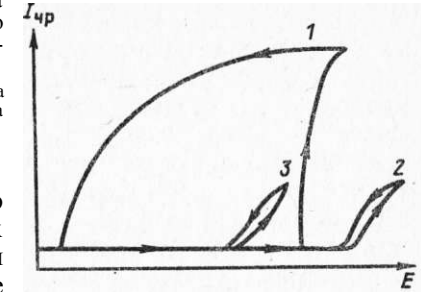
$$t_{кр} = (\beta V_0 - \nu_{чр}) / \beta \nu_{чр}. \quad (9.30)$$

Если после снижения напряжения критические ЧР в процессе дальнейшей работы не имеют места или изоляция не находится под напряжением, то образовавшиеся газовые включения растворяются в масле и напряжение ЧР увеличивается.

Изложенный характер и закономерности протекания ЧР относятся к бумажно-масляной изоляции. При пропитке бумажного конденсаторного диэлектрика газостойкими жидкостями, например хлордифенилами или их заменителями, характер развития и протекания процессов имеет некоторые особенности. Эти жидкости при разложении под воздействием ЧР не выделяют такого количества газов, как это имеет место при пропитке нефтяным маслом, благодаря чему напряжение возникновения ЧР не снижается. Однако под воздействием ЧР эти жидкости могут разлагаться; например, из хлордифенилов выделяется углерод в виде сажи, углеродные соединения и хлористый водород, что приводит к увеличению $\text{tg}\delta$ и способствует разрушению твердого диэлектрика. В целом, однако, рост интенсивности ЧР и разрушение твердой фазы конденсаторного диэлектрика с пропиткой газостойкими жидкостями происходит значительно медленнее, чем диэлектрика с пропиткой нефтяным маслом. Если диэлектрик, пропитанный

Рис. 9.5. Характерные зависимости тока ЧР $I_{чр}$ от напряженности электрического поля E при подъеме и снижении напряжения:

1 — пропитка нефтяным маслом; 2 — пропитка трихлордифенилом, $\Theta = 80^\circ \text{C}$; 3 — пропитка трихлордифенилом, $\Theta = 20^\circ \text{C}$



этим жидкостями, довести до возникновения в нем критических ЧР и оставить его при этом напряжении, то через некоторое время ЧР прекратятся. Причина этого заключается в том, что выделяющийся при разложении жидкостей углерод шунтирует очаг ЧР и гасит ЧР, чему благоприятствуют также малое газовыделение и большая газопоглощающая способность этих жидкостей. Для того чтобы вновь вызвать появление критических ЧР, нужно повысить напряжение против прежнего уровня, при этом процесс снова пойдет так, как описано выше.

Затухание ЧР особенно заметно при вязкости жидкости ниже $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. На рис. 9.5 [9.6] приведены зависимости тока ЧР конденсаторов, пропитанных различными жидкостями, от напряженности электрического поля при разных температурах. Как видно из этого рисунка, с повышением температуры (снижением вязкости) затухание ЧР происходит при меньшем снижении напряженности, т. е. быстрее. При кинематической вязкости жидкостей ниже $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ неоднократные, быстро следующие друг за другом повышения напряжения до значения возникновения ЧР не приводят к снижению напряженности ЧР. Опыты показали, что конденсаторы, пропитанные газостойкими жидкостями, работают без выхода из строя более 10^3 ч при напряженности критических ЧР, тогда как конденсаторы с пропиткой нефтяным маслом в таком режиме работают не более 1—6 ч.

9.3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Зависимость напряженности ЧР от толщин диэлектрика и фольги. В изоляции секций конденсаторов ЧР возникают в местах с наибольшей напряженностью электрического поля, что в большинстве случаев соответствует области на краю (на острых кромках) фольги, вблизи токопроводящих включений в конденсаторной бумаге, в местах расположения вкладных выводов, в складках, возникающих при намотке секций.

В большинстве случаев ЧР возникают на краю фольги. В этом случае максимальная напряженность вблизи острой кромки определяется так: в случае бесконечно тонких обкладок (рис. 2.1)—формулами (2.34) или (1) табл. 2.1; в случае обкладок с толщиной, соизмеримой с толщиной диэлектрика секции и со скрытой фольгой (рис. 2.3, а)—формулой (9) табл. 2.1 и в случае расположения обкладок (рис. 2.3, б)—формулой (8) табл. 2.1.

Используя указанные формулы, можно принять, что ЧР возникают при условии, что напряженность электрического поля вблизи кромки фольги на расстоянии ρ от края фольги ($\rho \ll d_c$) достигнет значения E_{p0} , при котором возникает пробой окружающей среды (пробой жидкого и газообразного диэлектрика вблизи острой кромки), т. е. при условии

$$E_{zp} = E_{p0} \quad (9.31)$$

Тогда в случае бесконечно тонких обкладок по рис. 2.1 на основании (2.34) или (1) табл. 2.1

$$U_{чр} = A_1 \sqrt{d_c} \quad (9.32)$$

$$E_{чр} = A_1 d_c^{-0.5}, \quad (9.33)$$

где

$$A_1 = E_{p0} \sqrt{4\pi\rho}.$$

Соответственно для случая расположения обкладок по рис. 2.4, а при $\lambda \rightarrow \infty$ на основании (2.35), (2.37) или (2) табл. 2.1 имеем для зависимости $E_{чр}$ от d_c также формулу (9.32), в которой

$$A_1 = E_{p0} \sqrt{2n\rho}.$$

В случае учета толщины обкладки d_ϕ и расположения обкладок по рис. 2.3, а на основании (9) табл. 2.1

$$U_{чр} = A_2 d_c^{2/3} \sqrt[3]{a_2} \quad (9.34)$$

и

$$E_{чр} = A_2 d_c^{-1/3} \sqrt[3]{a_2}, \quad (9.35)$$

где $A_2 = E_{p0} \sqrt[3]{3\pi\rho}$ и $a_2 = \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + d_\phi/d_c)^2}}$.

В случае расположения обкладок по рис. 2.3, б на основании (8) табл. 2.1

$$U_{чр} = A_2 d_c^{2/3} \sqrt[3]{\frac{a_3}{a_3 - 1}} \quad (9.36)$$

и
122

$$E_{чр} = A_2 d_c^{-1/3} \sqrt[3]{\frac{a_3}{a_3 - 1}}, \quad (9.37)$$

$$\text{где } a_3 = \left[1 + 2\frac{d_\phi}{d_c} + \sqrt{(1 + 2d_\phi/d_c)^2 - 1} \right]^2.$$

Следует, однако, отметить, что при определении $U_{чр}$ или $E_{чр}$ с учетом толщины фольги по формулам (9.34)—(9.37) необходимо учитывать, что значение E_{p0} , при котором возникает пробой среды вблизи острой кромки фольги, зависит от толщины фольги d_ϕ — уменьшается с возрастанием d_ϕ . Это приводит к тому, что изменение напряжения и напряженности ЧР с увеличением толщины фольги происходит сложнее, чем по указанным выше формулам.

Учет различия в диэлектрических проницаемостях среды [например, жидкого диэлектрика ϵ_{r2} и твердого диэлектрика ϵ_{r1} (см. рис. 2.7)] на основании (2.39) или (6) табл. 2.1 приводит к зависимостям $U_{чр}$ и $E_{чр}$ от d_c , аналогичным (9.32) и (9.33), в которых при $\lambda \rightarrow \infty$

$$A_1 = E_{p0} \sqrt{2\pi\rho} \sqrt{(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2\epsilon_1}. \quad (9.38)$$

Для конфигурации обкладок, показанных на рис. 2.8, на основании (2.41) имеем

$$U_{чр} = A_3 d^{1/(2-\alpha)}, \quad (9.39a)$$

$$E_{чр} = A_3 d^{-(1-\alpha)/(2-\alpha)}, \quad (9.39b)$$

в которых $A_3 = E_{p0} k(\alpha, \rho)$.

Формула (9.33) хорошо подтверждается экспериментально. На рис. 9.6 приведены зависимости напряженностей критических и начальных ЧР от толщины для различных видов диэлектрика. Эти зависимости могут быть представлены эмпирическими формулами, в которых показатель степени при d_c близок к $-1/2$. Зависимости средних значений напряженности начальных ЧР, МВ/м, с интенсивностью на уровне $3 \cdot 10^{-15} - 10^{-14}$ Кл от толщины диэлектрика образцов бумажной изоляции d_c , мм, пропитанной конденсаторным маслом [9.3], имеют вид

$$E_n = 3,6 d_c^{-0.5}, \quad (9.40a)$$

где $0,03 \leq d_c \leq 1,0$ мм.

Разброс значений E_n характеризуется среднеквадратичным отклонением $\sigma_n/E_n \approx 10\%$.

Зависимости напряженности критических ЧР, МВ/м, от толщины диэлектрика d_c , мм, для секций конденсаторов с изоляцией из бумаги КОН-1, пропитанной конденсаторным маслом или трихлордифенилом, имеют вид

$$E_{кр} = 9,5 < d_c^{-0.58}. \quad (9.40b)$$

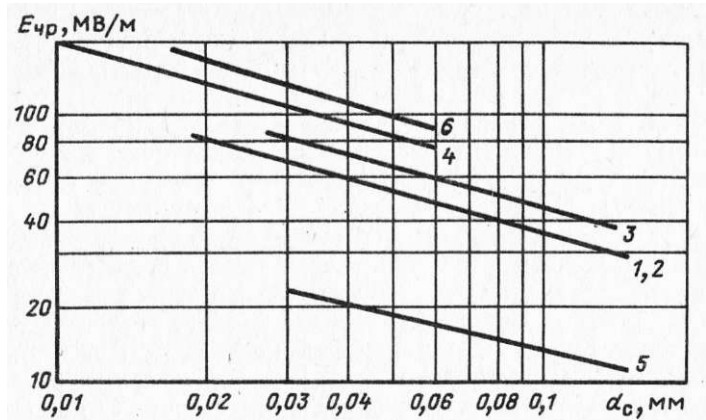


Рис. 9.6. Зависимости напряженности критических (1—4, б) и начальных (5) ЧР от толщины диэлектрика:
1 и 5—бумага КОН-1, пропитка конденсаторным маслом; 2—бумага КОН-1, пропитка трихлордифенилом; 3—бумажно-полипропиленовая изоляция, пропитка трихлордифенилом; 4—бумажно-полипропиленовая изоляция и полипропиленовая пленка, пропитка фенилксилэтаном; 6—полипропиленовая пленка, загнутые края фольги, пропитка фенилксилэтаном

Разброс напряженности критических ЧР для отдельных образцов характеризуется среднеквадратичным отклонением $\sigma_{кр}/E_{кр} \approx 7 \div 10\%$.

В многослойном диэлектрике силового конденсатора изменение количества слоев при одновременном изменении толщины слоя так, чтобы общая толщина диэлектрика оставалась неизменной, не изменяет значения $E_{кр}$. Постоянная A_1 в (9.33) определяется природой пропитывающей жидкости и зависит от температуры. Формула (9.33) показывает, что снижение d_c —общей толщины диэлектрика—позволяет повысить $E_{кр}$ —напряженность возникновения ЧР, что, в свою очередь, позволяет повысить рабочую напряженность. Для этого нужно повысить электрическую прочность диэлектрика, что достигается применением пленки.

Напряженности критических ЧР для полипропиленово-бумажной (50%-ной пленки) изоляции на 30% выше, а для полипропиленовой изоляции на 50% выше, чем для бумажной изоляции [9.7]. Это объясняется, главным образом, уменьшением относительной диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика ϵ_{r1} , так как в соответствии с (9.38) напряженность ЧР должна изменяться пропорционально $\sqrt{(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})/\epsilon_{r1}}$. Это также подтверждается данными работы [9.8], в которой получены зависимости напряженности критических ЧР от толщины диэлектрика для бумажного и пленочного (полипропилен) диэлектриков, пропитанных различными жидкостями,

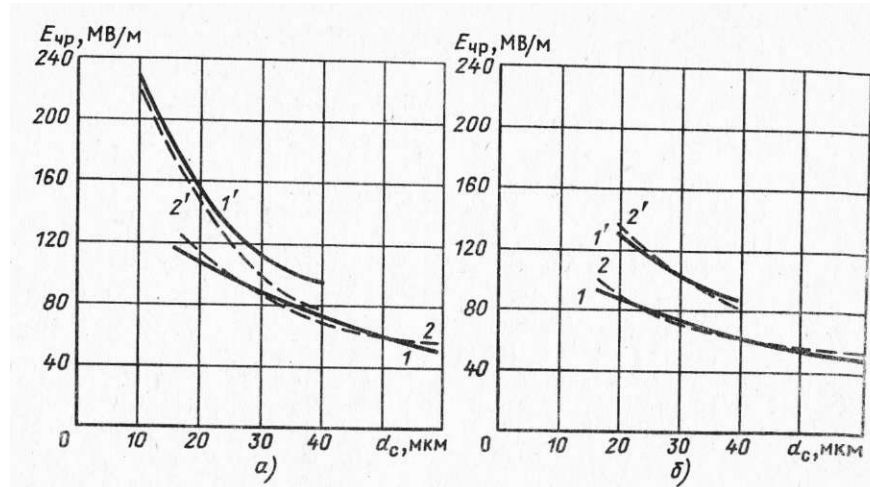


Рис. 9.7. Зависимость $E_{кр}$ от толщины диэлектрика, пропитанного конденсаторным маслом (а) и трихлордифенилом (б):
1 и 2—для бумажного диэлектрика; 1' и 2'—для пленочного диэлектрика (полипропиленовая пленка); 1 и 1'—опыт; 2 и 2'—расчет по (9.41)

в области толщин 10—60 мкм. Полученные данные представлены на рис. 9.6 и 9.7.

Авторы попытались связать полученные данные с результатами определения электрической прочности жидких диэлектриков $E_{прж} = E_{р0}$ в тонких слоях (рис. 9.8). При этом напряженность критических ЧР может быть определена по формуле, которая по структуре аналогична (9.33), с учетом (9.38) при $\epsilon_{r2} \gg \epsilon_{r1}$:

$$E_{кр} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}} \sqrt{\frac{d_{ф}}{d_c}} E_{пр ж}. \quad (9.41)$$

Как следует из рис. 9.7, значения $E_{кр}$, рассчитанные по (9.41), хорошо совпадают с экспериментальными.

Для пленочного диэлектрика на основе полипропиленовой пленки напряженности критических ЧР на 50% выше, чем для бумажного. Наиболее высокие значения $E_{кр}$ имеют место для полипропиленовой изоляции с пропиткой фенилксилэтаном.

На рис. 9.9 приведена зависимость напряженности поля в прослойке трихлордифенила комбинированного бумажно-пленочного диэлектрика с трихлордифениловой пропиткой от процентного содержания полипропиленовой пленки в твердой фазе. Как следует из этого рисунка, с увеличением доли пленки, имеющей диэлектрическую проницаемость ϵ_{rn} ,

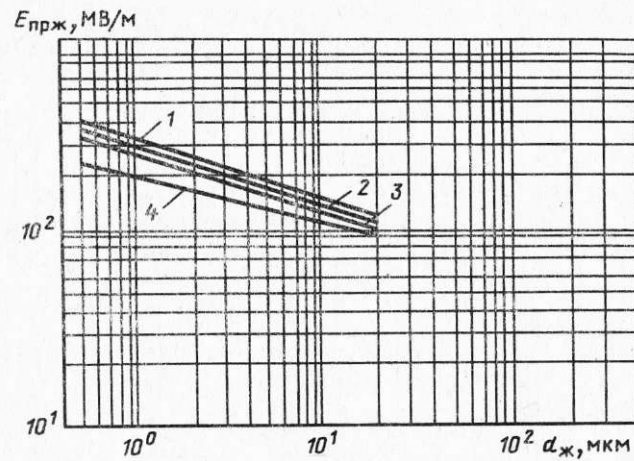


Рис. 9.8. Зависимость пробивной напряженности пропитывающего диэлектрика $E_{прж}$ от расстояния между электродами $d_{ж}$; постоянное напряжение: 1 — конденсаторное масло; 2 — фенилсилилэтан; 3 — бензилнеокапринат; 4 — трихлордифенил

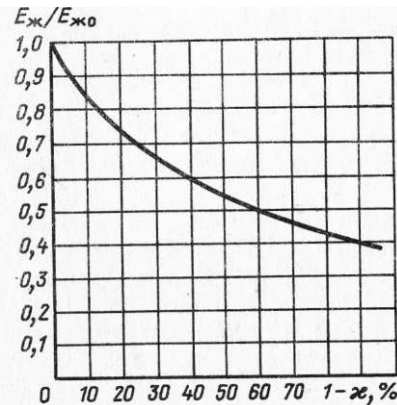


Рис. 9.9. Зависимость напряженности в прослойке жидкого диэлектрика $E_{ж}/E_{ж0}$ от содержания пленки φ в бумажно-пленочном диэлектрике (полипропиленовая пленка, пропитка трихлордифенилом $E_{ж0}$ — при $\varphi = 0$)

меньшую, чем у бумаги $\epsilon_{гб}$, напряженность поля в жидкости уменьшается, что приводит к возрастанию напряжения и напряженности ЧР при одинаковых толщинах диэлектрика (см. рис. 9.6). Это объясняется изменением соотношения объемов компонентов, имеющих различные диэлектрические проницаемости, в объеме диэлектрика. Аналогичные кривые могут быть построены и для других пропитывающих жидкостей.

В [9.9] указывается, однако, что при прочих равных условиях преимущество имеет диэлектрик, в конструкции которого с обеих сторон обкладки расположена бумага, что ослабляет напряженность электрического поля у края фольги. Отсюда следует, что в бумажно-пленочном диэлектрике число слоев бумаги должно быть на один больше числа слоев пленки. Это, однако, одновременно приводит к некоторому снижению доли пленки при неизменной общей толщине

диэлектрика, что обычно сказывается сильнее на уменьшении напряженности ЧР.

Исследование влияния структуры комбинированной бумажно-пленочной изоляции на напряженность электрического поля у края обкладки, выполненное в [9.10], показало, что при пропитке изоляции неполярной жидкостью расположение у края обкладки диэлектрика с большей диэлектрической проницаемостью (бумаги) приводит к снижению напряженности у края обкладки. Степень снижения напряженности тем выше, чем меньше доля бумаги в общей толщине диэлектрика.

При пропитке полярной жидкостью наилучшая структура поля наблюдается для чисто пленочного диэлектрика с использованием неполярной пленки. В случае комбинированной изоляции расположение у фольги диэлектрика с большей диэлектрической проницаемостью также приводит к снижению напряженности у края обкладки и соответственно к повышению напряженности ЧР.

Однако основными мероприятиями повышения напряженности ЧР являются уменьшение толщины диэлектрика и повышение доли пленки в бумажно-пленочной изоляции.

Толщина диэлектрика в секции силового конденсатора не является фиксированной, но зависит от коэффициента запаса напряжения возникновения ЧР возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением k уменьшается общая толщина диэлектрика, при этом уменьшается и толщина прослоек свободной пропитывающей жидкости, что увеличивает их электрическую прочность.

Несколько иные зависимости $E_{чр}(d_c)$ имеют место для изоляции с воздушными включениями. Такие включения могут образоваться в результате неправильного технологического процесса изготовления изоляции, неправильной эксплуатации, а также в результате воздействия перенапряжений и развития ЧР (например, хотя бы кратковременного существования критических ЧР). Для изоляции с резко неоднородным полем и газовыми включениями зависимость напряженности ЧР от толщины диэлектрика также определяется процессами на краю электродов и соответствует (9.33). Для изоляции со слабонеоднородным или однородным полем и газовыми включениями эти соотношения могут быть получены из рассмотрения эквивалентной схемы диэлектрика с газовым включением согласно рис. 9.1. В этом случае напряженность начальных ЧР [1.1]

$$E_H = \frac{U_{н.з}}{\epsilon_{рд} d_a} \left[\epsilon_{рв} + \frac{(\epsilon_{рд} - \epsilon_{рв}) d_n}{d_c} \right], \quad (9.42)$$

где $\epsilon_{гв} \approx \epsilon_0$ — диэлектрическая проницаемость газа; $\epsilon_{гд}$ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $d_в$ — толщина включения.

Выражение (9.43) показывает, что при неизменных размерах включения напряженность ЧР в области однородного поля падает с ростом толщины диэлектрика, однако зависимость $E_H(d_c)$ в этом случае значительно слабее, чем в сильнеоднородном поле.

Для повышения напряжения и напряженности ЧР и соответственно рабочей напряженности электрического поля можно использовать скругление края фольги, что обычно достигается загибом края фольги. При закруглении края фольги с радиусом закругления r для определения $E_{чр}$ можно пользоваться формулой, аналогичной (9.33), в которой для случая расположения обкладок по рис. 2.1

$$E_{чр} = E_{ч0} \sqrt{\frac{4\pi r}{d_c + r}} \quad (9.43)$$

Как показано в [9.11, 9.13, 9.14], скругление края фольги дает повышение напряжения начальных ЧР на 15—20% (см. рис. 9.6, кривая б), однако не столь значительно, какое можно было ожидать на основании расчета электрического поля, что можно объяснить зависимостью $E_{r0} = E_{p0}$ от толщины фольги. На рис. 9.10 приведены зависимости анодного тока фотоэлектронного умножителя, пропорционального мощности ЧР, от воздействующего на изоляцию напряжения. В первой партии (кривая 1) образцы имели электроды из алюминиевой фольги толщиной 20 мкм (два слоя по 10 мкм) без специальной обработки края, а во второй партии (кривая 2) электроды имели ту же толщину 20 мкм, но с радиусом скругления около 10 мкм (загиб края фольги толщиной 10 мкм). Как следует из рисунка, увеличение радиуса скругления края электрода дало повышение напряжения начальных ЧР, измеренных на уровне 10^{-14} — 10^{-15} Кл, примерно на 15%. Это можно объяснить тем, что одновременно с увеличением радиуса скругления снижается напряженность у края электрода, однако увеличивается площадь поверхности электродов, у которой напряженность имеет наибольшее значение, и толщина прослойки жидкого диэлектрика.

В секциях за счет колебания размеров фольги в пределах допуска и неизбежного разбега при намотке один край фольги периодически оказывается утопленным внутри секции. Это приводит к увеличению напряженности на утопленном краю фольги, причем если смещение превосходит на порядок и более толщину изоляции, то, как следует из формул (1), (3), (5) табл. 2.1, напряженность на утопленном крае фольги возрастает приблизительно в 2 раза [9.13, 9.14].

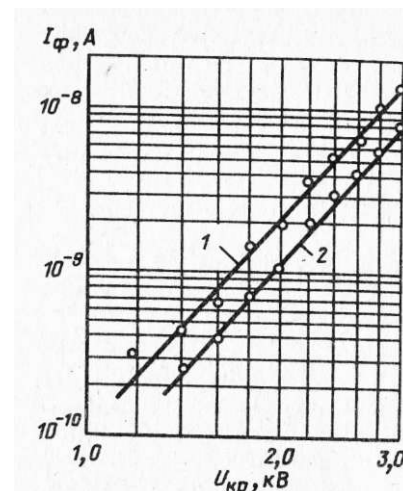


Рис. 9.10. Зависимость мощности ЧР (анодного тока I_ϕ ФЭУ) от напряжения на образцах изоляции толщиной 60 мкм; толщина фольги 20 мкм:

1 — без скругления края фольги; 2 — с скруглением края фольги, радиус скругления 10 мкм

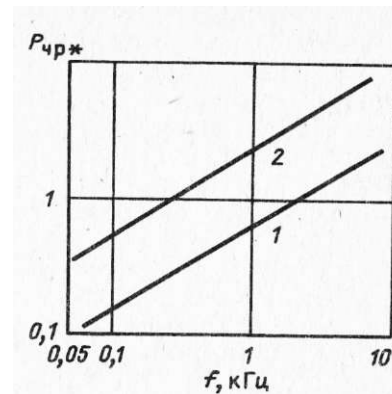


Рис. 9.11. Зависимость относительной мощности ЧР от частоты приложенного напряжения ($d_c = 30$ мкм):

1 — $E = 40$ МВ/м; 2 — $E = 50$ МВ/м

Для улучшения характеристик ЧР и повышения ресурса противоположные обкладки предполагается располагать со строго контролируемым сдвигом. Целесообразно покрывать утопленный край обкладки тонким слоем твердого электроизоляционного материала или загибать его по всей длине, при этом также целесообразно покрывать его твердым изоляционным материалом. Диэлектрическая проницаемость твердого покрытия должна быть выше, чем у жидкости и пленки. Покрытие может наноситься путем отверждения полимеров в тлеющем разряде или традиционными способами (как, например, полиэферы, поликарбонат и др.).

Зависимость характеристик ЧР от частоты приложенного напряжения. Повышение частоты приложенного напряжения не меняет характера зависимости мощности ЧР $P_{чр}$ от напряженности электрического поля, однако приводит к увеличению интенсивности ЧР, что можно объяснить увеличением числа полупериодов, а следовательно, и числа разрядов в секунду $n_{чр}$ (см. рис. 9.3). Однако увеличение $P_{чр}$ и $n_{чр}$ с ростом частоты f происходит не пропорционально частоте, как это следует из формул (9.17) и (9.16), а несколько слабее (рис. 9.11). На основании экспериментальных данных установлена следующая зависимость [9.6]:

$$P_{чр} = A_3 f^{0.62} \quad (9.44)$$

В диапазоне до 1 кГц электрическая прочность газовых включений и масляных прослоек практически не зависит от

частоты. Кроме того, распределение переменного напряжения по толщине изоляции и на краю электрода (при удельном поверхностном сопротивлении 10^{11} Ом) определяется соответствующими значениями диэлектрической проницаемости, которые для частоты до 10 кГц в большинстве случаев слабо зависят от частоты. Поэтому в области частот до 10^5 Гц напряженность начальных ЧР практически не зависит от частоты.

Если начальные ЧР в изоляции возникают в результате пробоя масляных пленок, то в этом случае при частотах более 10^5 Гц необходимо учитывать снижение электрической прочности масла с ростом частоты. Например, при повышении частоты от 50 до 10^6 Гц прочность конденсаторного масла снижается примерно на 30%. Указанное обстоятельство приводит к соответствующему снижению напряжения и напряженности начальных ЧР. Напряжение и напряженность критических ЧР существенно зависят от частоты приложенного напряжения.

Если возникновение критических ЧР определяется условием (9.24), что имеет место для изоляции, пропитанной нефтяным маслом, то при различных частотах это условие имеет вид

$$v_{чрf} = \gg v_{чр50}, \quad (9.45)$$

где $v_{чр50}$ и $v_{чрf}$ — интенсивность газовыделения в единицу времени при напряжении частотой 50 Гц и f , поскольку интенсивность газопоглощения от частоты приложенного напряжения не зависит.

Тогда, используя (9.17) и (9.23) с учетом $U_3 \approx U_n \approx U_n$, получаем

$$\begin{aligned} v_{чрf} &= P_{чр} B = 2fB(C_d + C_B)(U_{Вм} - U_{в.н})(U_{в.з} + U_{в.н}) = \\ &= 2fB(C_d + C_B)\eta^2 U_n(U_m - U_n). \end{aligned} \quad (9.46)$$

Так как напряжение начальных ЧР слабо зависит от частоты, то условие (9.45) для возникновения критических ЧР на основании (9.46) можно представить следующим образом:

$$U_{крf} - U_n = \frac{50}{f}(U_{кр50} - U_n). \quad (9.47)$$

Из (9.47) находим

$$U_{крf} = \frac{50}{f}(U_{кр50} - U_n) + U_n. \quad (9.48)$$

Таким образом, при достаточно больших частотах напряженность критических ЧР стремится к напряжению начальных ЧР. Расчетная зависимость, вычисленная по (9.48) для изоляции толщиной 80 мкм из конденсаторной бумаги, пропитанной нефтяным маслом и совпадающая с аналогичной опытной

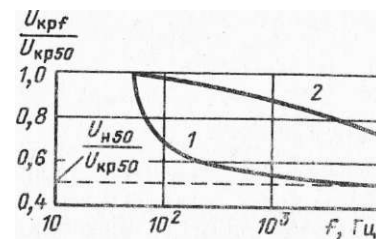


Рис. 9.12. Зависимость напряжения критических ЧР от частоты приложенного напряжения для бумажной изоляции: 1 — пропитка конденсаторным маслом; 2 — пропитка трихлордифенилом

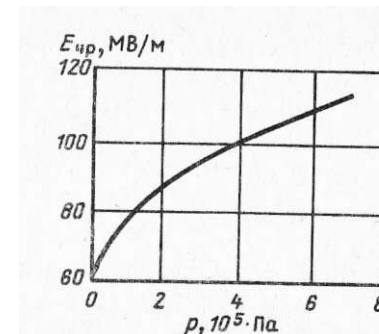


Рис. 9.13. Зависимость напряжения критических ЧР от давления масла ($d_c = 50$ мкм)

зависимостью, приведена на рис. 9.12. Как следует из этого рисунка, при $f > 1$ кГц напряжение критических ЧР практически не отличается от напряжения начальных ЧР. Для изоляции с пропиткой хлоридифенилами зависимость напряжения критических ЧР от частоты заметно слабее вследствие большей стойкости этих жидкостей к газовыделению в электрическом поле.

Зависимость характеристик ЧР от избыточного давления пропитывающего состава. Повышение избыточного давления пропитывающего состава приводит к увеличению напряжения ЧР. Такое влияние избыточного давления сказывается при ЧР, являющихся результатом пробоев как прослоек жидкого диэлектрика, так и газовых включений. В первом случае с ростом избыточного давления увеличивается электрическая прочность жидкости. Это увеличение имеет место как для дегазированного, так и для недегазированного жидкого диэлектрика, хотя для дегазированного диэлектрика зависимость несколько слабее. Во втором случае с ростом давления увеличивается прочность газового включения. Пробои газовых включений возможны, когда размеры их достаточно велики и достигают десятки микрон и более. Для включений таких размеров с повышением избыточного давления пробивное напряжение возрастает.

На рис. 9.13 приведена зависимость $E_{кр}$ от избыточного давления масла [9.3]. Анализ кривой рис. 9.13 показывает, что напряжение критических ЧР с ростом давления увеличивается приблизительно во столько же раз, во сколько увеличивается прочность нефтяного масла. Зависимость напряженности критических ЧР от давления $P_{жс}$ в диапазоне от 10^5 до

7×10^5 Па для конденсаторной изоляции из бумаги КОН-1 может быть представлена в виде

$$E_{кр} = 35(1 + 1,1 \cdot 10^{-6} P_{ж}), \quad (9.49)$$

где

$E_{кр}$ — в МВ/м, $P_{ж}$ — в Па.

Опыт показывает, что повышение избыточного давления сверх определенного значения нерационально, так как приводит к незначительному повышению кратковременной электрической прочности изоляции, что ограничивает допустимые напряженности, при этом выбираемые уже с точки зрения кратковременной прочности и воздействующих перенапряжений. Так, для конденсаторной изоляции с толщиной диэлектрика 50—100 мкм повышение давления рационально до $(6—8) \cdot 10^5$ Па. Обычно конденсаторы с избыточным давлением масла изготавливаются при давлениях до $(3—4) \cdot 10^5$ Па. Уменьшение давления ниже атмосферного может привести к снижению напряжения ЧР [9.7]. Такое явление может произойти вследствие снижения давления в герметизированном конденсаторе при уменьшении температуры.

Зависимость напряженности ЧР от температуры. Напряженность ЧР в диэлектрике конденсатора зависит от температуры, причем температурное изменение ее различно для пропитки маслом и полярными жидкостями. Для бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур от 40 до 80° С имеет место весьма слабая тенденция к увеличению (напряженности ЧР с ростом температуры (рис. 9.14, а, кривая 1). Бумажный диэлектрик, пропитанный полярными жидкостями, имеет более сложную температурную зависимость (кривые 2—5) [9.8]. Для этой зависимости характерно наличие минимума $E_{кр}$. На частоте 50 Гц минимум $E_{кр}$ имеет место при температуре T_m , превышающей температуру T_d дипольного максимума $\text{tg}\delta$ примерно на 30° С и совпадающей с температурой минимума $\text{tg}\delta$ [9.8]. При температуре T_m значение $E_{кр}$ практически вдвое меньше ее значения при температуре +100° С. Изменение $E_{кр}$ бумажного диэлектрика, пропитанного полярной жидкостью, при изменении температуры в пределах от значения T_d до 373 К (+100° С) хорошо описывается эмпирической формулой (6.11) [9.91]. Изменение температуры от точки T_m в ту или другую сторону имеет следствием увеличение $E_{кр}$. Наличие минимума в температурной зависимости $E_{кр}$ объясняется аналогичным минимумом в зависимости пробивной напряженности пропитывающих жидкостей от температуры (см. рис. 6.1). Несколько более слабый минимум в температурной зависимости наблюдается в конденсаторах с бумажно-пленочным

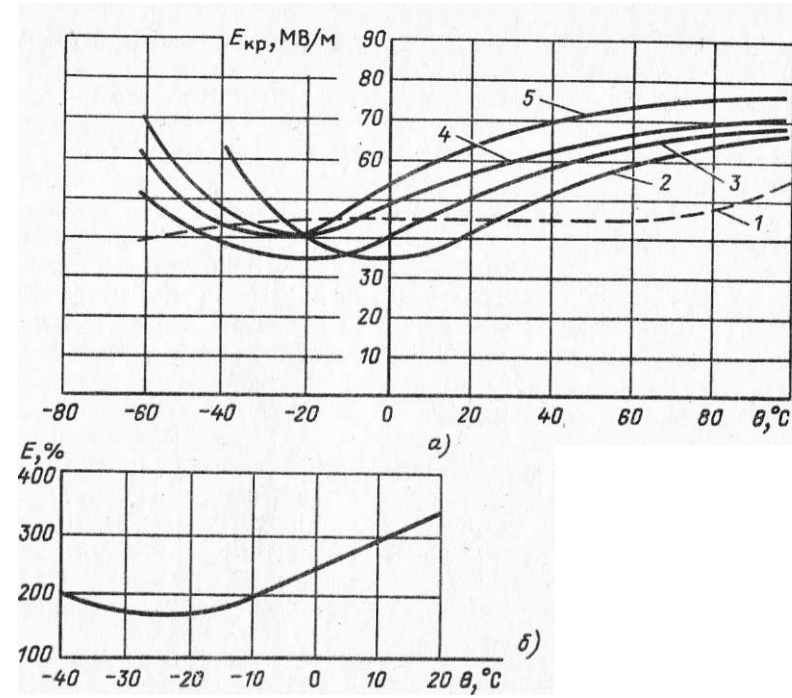


Рис. 9.14. Зависимость напряженности критических ЧР от температуры для бумажной изоляции, пропитанной различными жидкими диэлектриками (а) (1—нефтяное конденсаторное масло; 2—трихлордифенил; 3—КЖ1-35; 4—КЖ2-45; 5—КЖ2-50) и для пленочно-бумажного диэлектрика (полипропиленовая пленка, пропитка трихлордифенилом) (б) (на рис. б значения напряженности в процентах от рабочей)

диэлектриком на основе полипропиленовой пленки с пропиткой трихлордифенилом (см. рис. 9.14, б) [6.2].

Зависимость напряжения критических ЧР от формы кривой воздействующего напряжения. Как следует из (9.15), при синусоидальном напряжении число ЧР за полупериод определяется амплитудой приложенного напряжения и напряжениями зажигания и погасания ЧР. Так как после прохождения напряжения через максимум разряды возникают вновь после изменения напряжения на величину $\Delta U_1 = U_s + U_n$, то дополнительные ЧР за период возможны, если в кривой воздействующего напряжения имеются провалы глубиной более ΔU_1 . Если в кривой провалов нет или они имеют меньшую глубину, то число ЧР за полупериод, а следовательно, и напряжение критических ЧР не зависят от формы этой кривой. Напряжение начальных ЧР зависит лишь от амплитуды и в любом случае от формы напряжения не зависит.

Влияние плотности бумаги на характеристики ЧР. Изменение плотности бумаги вызывает изменение характеристик ЧР. С одной стороны, увеличение плотности бумаги приводит к увеличению электрической прочности листов бумаги, во-первых, вследствие увеличения содержания клетчатки в листе, во-вторых, в результате сокращения размеров элементарных каналов в бумаге, заполненных пропитывающей жидкостью. С другой стороны, увеличение плотности бумаги при $\epsilon_{рж} > \epsilon_{ржс}$ приводит согласно соотношению (5.2а) к росту диэлектрической проницаемости листа бумаги $\epsilon_{рб}$, что при $\epsilon_{ржс} < \epsilon_{рж}$ сопровождается увеличением напряженности в прослойках жидкого диэлектрика и приводит к снижению напряженностей ЧР. Вследствие этого влияние плотности бумаги по-разному сказывается на кратковременной и длительной прочности изоляции.

При определении кратковременной прочности преобладает влияние первого фактора, способствующего ее увеличению с ростом плотности бумаги. При определении длительной прочности, для которой частичные разряды в прослойках жидкого диэлектрика играют определяющую роль, увеличение плотности бумаги приводит к снижению напряжения (напряженности) ЧР и сокращению ресурса изоляции.

Влияние времени между изготовлением и испытанием. В бумажных конденсаторах напряжение ЧР возрастает в процессе хранения в течение первых 1—2 недель, особенно если конденсаторы были изготовлены при недостаточно высоком вакууме. Это можно объяснить растворением остаточного воздуха в пропитывающем составе [9.7], а также диффузией хлорированных жидкостей в полипропиленовую пленку. Для пленочных конденсаторов повышение напряжения ЧР происходит при хранении в течение 5 дней. В [9.7] для конденсаторов с изоляцией из полипропиленовой пленки, пропитанной трихлордифенилом, для достижения высоких значений напряжения ЧР указывается необходимость хранения в течение минимум 7—24 дней.

9.4. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Эксплуатация изоляции конденсаторов на постоянном напряжении показала, что ЧР в ряде случаев оказывают существенное влияние на старение изоляции. В качестве примера можно указать на различие в ресурсе конденсаторов с твердой и с маловязкой пропиткой. У первых благодаря наличию газовых полостей и развитию в них интенсивных разрядов ресурс при постоянном напряжении значительно меньше. При постоянном напряжении, так же как и при переменном, ЧР

представляют собой пробои участков изоляции с пониженной электрической прочностью, например, газовых включений или пленок жидкого диэлектрика в слоистой изоляции. Существенное отличие в протекании процесса на постоянном напряжении заключается в том, что интенсивные ЧР типа критических имеют место только при включении напряжения или его изменении во времени. В результате ЧР на стенках газовых включений образуются поверхностные заряды. Дополнительное поле этих зарядов $E_{нов}$ направлено навстречу основному, что вызывает ослабление результирующей напряженности во включении.

В момент погасания разряда результирующая напряженность равна напряженности погасания $E_{вн}$:

$$E_{рез} = E_{вн} - E_{0нов} = E_{вн}, \quad (9.50)$$

где $E_{вн}$ — напряженность во включении, создаваемая приложенным напряжением в предположении отсутствия в нем разряда. Схематически это показано на рис. 9.15. В дальнейшем после погасания разряда за счет проводимости бумаги и пропитывающего состава происходит стекание поверхностного заряда $q_{нов}$, при этом напряженность, созданная поверхностными зарядами, изменяется по закону

$$E_{пов} = E_{пов} \exp(-t/\tau_n), \quad (9.51)$$

где $\tau_n = \rho_v \epsilon_r$ — постоянная времени стекания поверхностного заряда через проводимость изоляции.

Условием повторного ЧР для установившегося значения постоянного напряжения является равенство

$$E_{0пов} [1 - \exp(-\Delta t/\tau_n)] = E_{вз} - E_{вн}. \quad (9.52)$$

В результате стекания заряда напряженность во включении возрастает, и следующий ЧР произойдет, когда напряженность, создаваемая поверхностным зарядом, уменьшится на величину, равную разности между напряженностями зажигания $E_{вз}$ и погасания $E_{вн}$ ЧР.

Интервал времени между ЧР в рассматриваемом включении на основании (9.50) и (9.52)

Учитывая также, что при значительных приложенных напряжениях $E_{вл} < E_{вн}$, на основании (9.50) получаем

и

Таким образом, при заданной постоянной времени изоляции τ_n интервал между ЧР определяется степенью превышения приложенного напряжения U над напряжением зажигания $U_з$ или погасания U_n ЧР. Обычно значение τ_n при температуре 20°С составляет сотни и тысячи секунд, в результате чего интервалы

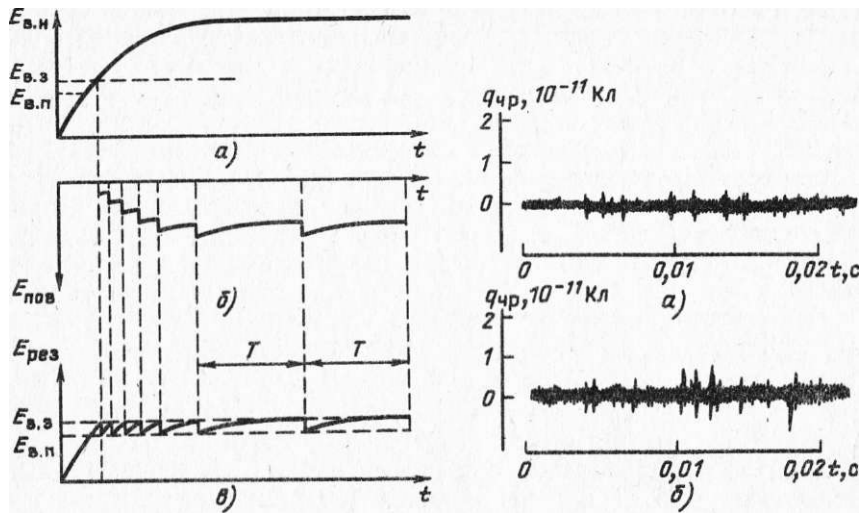


Рис. 9.15. Изменение результирующей напряженности во включении при воздействии постоянного напряжения: а — напряженность поля, создаваемая приложенным напряжением; б — напряженность поля, создаваемая поверхностным зарядом; в — результирующая напряженность во включении

Рис. 9.16. Характерные осциллограммы ЧР при постоянном напряжении: а — $\Theta = 20^\circ \text{C}$; б — $\Theta = 80^\circ \text{C}$

между ЧР во включении имеют длительность порядка единиц или десятков секунд. Это на несколько порядков меньше, чем при напряжении промышленной частоты. Характерные осциллограммы ЧР при постоянном напряжении приведены на рис. 9.16.

На постоянном напряжении даже при наличии острого края электрода ЧР развиваются по всей площади электрода. Это объясняется ослаблением краевого эффекта вследствие появления при постоянном напряжении значительной по сравнению с поперечной проводимостью продольной проводимости прослоек жидкого диэлектрика бумажно-пропитанной изоляции. При постоянном напряжении напряженности начальных ЧР значительно выше, чем при переменном, и существенно зависят от температуры изоляции (рис. 9.17) и ее влажности.

Изменение толщины конденсаторной изоляции в диапазоне от 30 до 300 мкм практически не сказывается на напряженности ЧР, что объясняется отсутствием влияния краевого эффекта электродов. При постоянном напряжении, так же как и при переменном, зависимости тока и мощности ЧП от напряжения напряженности хорошо описываются функциями

$$I_n = I_{n0} (E/E_n)^{a_2}; \quad (9.56)$$

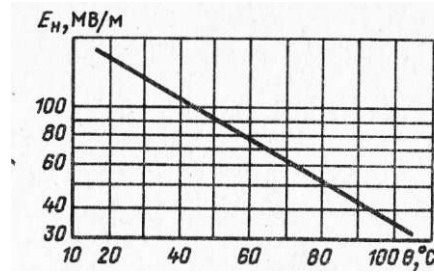


Рис. 9.17. Зависимость напряженности начальных ЧР от температуры при постоянном напряжении (бумага КОН-2, пропитанная конденсаторным маслом, $d_c = 80 \text{ мкм}$)

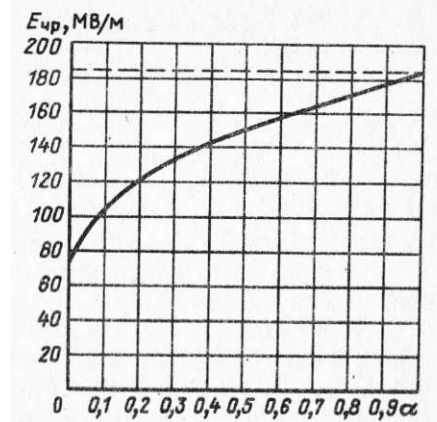


Рис. 9.18. Зависимость $E_{чр}$ при смешанном напряжении от α ($d_c = 50 \text{ мкм}$): сплошная кривая... напряженность ЧР при переменном напряжении, амплитудные значения; пунктир — то же при постоянном напряжении

$$P_n = P_{n0} (E/E_n)^{a_3} = A_4 E^{a_3} \quad (9.57)$$

в которых показатели степени a_2 и a_3 существенно больше, чем в аналогичных зависимостях для переменного напряжения: $a_2 = 9$ и $a_3 = 10$. Для отдельных образцов $8 \leq a_3 \leq 14$.

9.5. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ ПРИ СМЕШАННОМ НАПРЯЖЕНИИ

В конденсаторах, работающих при смешанном или пульсирующем (содержащем постоянную и переменную составляющие) напряжении, напряженность возникновения ЧР будет зависеть не только от электрофизических параметров компонентов, но и от соотношения между постоянной и переменной составляющими α , что нетрудно показать с помощью формул (3.5) с использованием (8.8) При $\alpha = 0$ (т. е. при равной нулю постоянной составляющей) напряженность возникновения ЧР будет совпадать со значением для переменного напряжения, при $\alpha = 1$ — для постоянного. При $0 < \alpha < 1$ значение $E_{чр}$ будет плавно изменяться от значения при переменном до значения при постоянном напряжении (рис. 9.18). При смешанном напряжении могут возникать как начальные, так и критические ЧР. Интенсивность критических ЧР уменьшается с увеличением α , и при значениях α , близких к единице, имеют место только начальные ЧР. Как и при других родах напряжения, при смешанном напряжении напряженность возникновения ЧР зависит от температуры и влажности диэлектрика. Влияние толщины диэлектрика также зависит от α . При малых α оно будет большим, при больших α — малым.