

## ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УТЕЧКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

*Институт энергетики АН РМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Данная работа посвящена диэлектрическим барьерам в поле плоского воздушного промежутка. Барьеры исследовались с целью получения наибольшего распределенного тока с учетом стойкости к электрическому пробоям.

Введем критерий оценки для диэлектрических барьеров:

$$K = I_{\max} \cdot t \cdot U^{-1} = \frac{I \cdot t}{U} = \frac{Q}{U}, \quad (1)$$

где  $t$  и  $U$  – время и напряжение пробоя.

Представляет интерес барьер с самым высоким критерием  $K$ , то есть, который пропускал бы наибольший распределенный ток при наименьшем напряжении на промежутке и максимально возможной длительностью. Проанализировав размерность критерия, видим, что он совпадает с электрической емкостью:

$$K = \frac{Q}{U} = C.$$

Испытания барьеров проводились между двумя пластинами, где обязательно присутствовал воздушный зазор. На пластины подавалось постоянное высокое напряжение, регистрировался ток и время до пробоя при фиксированном напряжении. Оценка по выбранному критерию показала несомненное преимущество гетинакса над такими материалами, как дерево, стеклотекстолит, стекло, оргстекло, полиэтилен, фторопласт. На втором месте стояло дерево. Корреляция по относительной диэлектрической проницаемости не прослеживалась.

Эксперименты показали, что основную роль в барьерах с высоким критерием  $K$  играл начальный ток утечки. Любой малый ток через газовый промежуток состоит из дискретных импульсов различной величины с определенным частотным диапазоном. Поэтому появление малого тока утечки барьера означает появление переменной составляющей тока. Эта переменная составляющая легче проходит через барьер с высокой диэлектрической проницаемостью. Однако до тех пор, пока утечки нет и нет тока переноса через промежуток.

Если подключить последовательно с плоским промежутком с диэлектрическим барьером острый промежуток, то получим увеличение тока переноса. Можно говорить о повышении критерия  $K$  для диэлектрического барьера. На наш взгляд, это связано с появлением переменной составляющей тока по следующему механизму.

Острый и плоский промежуток можно рассматривать как два последовательных конденсатора  $C_0$  и  $C_{пл}$ . Емкость второго намного больше, а электрическая прочность первого намного меньше. При включении высокого напряжения происходит заряд конденсаторов токами смещения, но возможно также наличие токов автоэлектронной эмиссии и небольших токов утечки диэлектрика. Не принимая во внимание последние, через определенное время получим два последовательно заряженных конденсатора  $C_1$  и  $C_2$  с напряжениями на них  $U_1 \gg U_2$  и зарядами  $Q_1 = C_1 U_1$  и  $Q_2 = C_2 U_2$ , которые равны друг другу из-за последовательного характера соединения. После пробоя  $C_1$  потенциал среднего электрода резко изменяется, что приводит к увеличению тока смещения через  $C_2$ . Получается автоколебательная система. В нашем случае такая система приобретает свойства дозатора тока через разрядный промежуток со свойствами инвертора напряжения (постоянное – в пульсирующее). Защита от пробоя гарантируется качеством диэлектрического барьера, а величина тока определяется его площадью и диэлектрической проницаемостью.

Такой механизм используется уже давно, например в озонаторах со стеклянным барьером.

Роль острия выполняет шероховатость электрода, отделенного газом от стекла. Интересная особенность данного промежутка в том, что на емкости  $C_2$  (рис. 1) скапливается заряд одного знака, того же, что и на острие. Это происходит из-за того, что конденсатор  $C_2$  практически не пропускает постоянную составляющую, а  $C_1$  при пробое пропускает ток определенного знака. В промышленных озонаторах избыточный ток перезаряжается с частотой сети. Для озонаторов большой производительности такая низкая частота является главным ограничителем процесса.

На рис. 2 показана эквивалентная схема промежутка с утечкой:  $D_1$  – пороговый элемент, который открывается при  $U_{C_1} > U_D$ , а после разрядки  $C_1$  восстанавливает свои свойства.

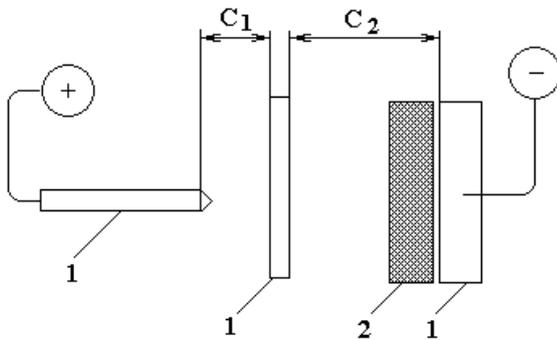


Рис. 1. Последовательно соединенные острый и барьерный промежутки.  
1 – металл; 2 – диэлектрик;  $C_1$  – емкость плоского (барьерного) промежутка.

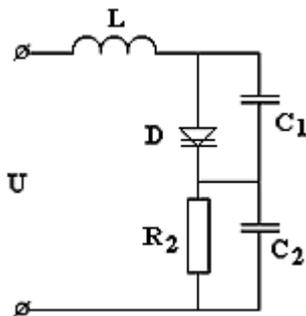


Рис. 2. Эквивалентная схема.  $R_2$  – сопротивление утечки;  $D$  – пороговый элемент;  $C_1$  – емкость острейного (в более общем плане воздушного) промежутка;  $C_2$  – емкость плоского промежутка (в более общем плане барьера);  $L$  – индуктивность цепи, которая в типичном случае мала и определяется подсоединительными проводами.

Сопротивление утечки  $R_2$  определяет производительность процесса. При  $R_2 \rightarrow \infty$   $C_2$  заряжается довольно быстро и разряды  $C_1$  прекращаются. Способ повышения производительности установки – увеличение частоты напряжения на электродах. Введем емкость воздушного зазора, равную сумме емкостей острейных промежутков в нашей модели:

$$C_{\Sigma 1} = \sum C_1. \quad (2)$$

Тогда ток разряда каждого острия должен уравновеситься током источника:

$$C_{\Sigma 1} \cdot U_1 \cdot f_1 = C_1 \cdot U_D \cdot f_2, \quad (3)$$

где  $U_1$  и  $f_1$  – напряжение и частота источника;  $U_D \cdot f_2$  – напряжение и частота перекрытия воздушного промежутка.

Не эффективно с целью уменьшения частоты источника искусственно увеличивать емкость  $C_{\Sigma 1}$  путем подключения параллельной емкости, так как большую часть периода напряжение на воздушном промежутке будет меньше пробойного:

$$U_1 < U_D. \quad (4)$$

Поэтому для увеличения производительности надо увеличивать частоту источника до частоты перекрытий, то есть до десятков килогерц.

Другой путь – увеличение утечки. Уменьшив  $R_2$ , пропустим ток переноса мимо емкости  $C_2$ :

$$I_2 = C_1 f_2 \cdot U_D = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U C_1}{R_2 (C_1 + C_2)}. \quad (5)$$

Откуда

$$R_2 = \frac{U}{U_D f_2 (C_1 + C_2)}. \quad (6)$$

С сопротивлением утечки, рассчитанным по (6), промежуток будет работать даже на постоянном напряжении. Однако переменная частота источника позволит понизить ток утечки, так как параллельно  $R_2$  будет перезаряжаться емкость  $C_2$  с частотой источника; таким образом общий ток переноса пополнится частью тока смещения  $C_2$  на частоте источника  $f_1$ :

$$i_{\Sigma} = \frac{U_2}{R_2 \left\| \frac{1}{\omega_1 C_2 \cdot \gamma} \right.} = \frac{UC_0(2\pi f_1 C_2 \cdot l_2 + \gamma)}{(C_1 + C_2) \cdot R_2 \cdot \gamma}, \quad (7)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ;  $\gamma$  – доля тока, для которого выполняется условие (4).

Оценим частоту источника как

$$f_1 \approx \frac{1}{2\pi R_2 (C_2 + C_1)} \quad (8)$$

или с учетом (6):

$$f_1 = \frac{U_D \cdot f_2}{2\pi \cdot U} \approx \frac{f_2}{10}. \quad (9)$$

Таким образом верхняя граница частоты источника остается недостижимо высокой и может использоваться разве что для ограничения мощности, выделяемой на барьере, так как  $R_2$  – параметр, зависимый от условий процесса. Однако в случае  $R_2 \gg R_{\text{опт.им}}$  по условию (5) частота источника может иметь приемлемое для реализации значение, то есть на несколько порядков меньше  $f_2$ . Поэтому оценка частоты источника по условию (8) может сэкономить значительную часть затрат на высоковольтный источник.

Приведенный выше анализ показал важную роль утечки диэлектрического барьера в системах с распределенным током. Это подтвердили упомянутые выше эксперименты.

В литературе проанализированы времена сохранения электрической прочности материалов с большими потерями (с высоким  $\text{tg } \delta$ ).

Рис. 3 заимствован из [1]. Такая же качественная картина получена нами для гетинакса.

Большая проблема состоит в получении высокой производительности по пропущенному через барьер току при длительной работе, то есть увеличение емкости барьера (критерий К).

Увеличение толщины и объема барьера в целом увеличивает ток утечки и одновременно вероятность пробоя. Поэтому увеличение электрической прочности барьеров с большими потерями можно ожидать в связи с технологическими новшествами: такими, как слоистые структуры с разнородными диэлектриками и взаимным перекрытием по толщине. Большое значение имеет термостойкость таких барьеров. Однако в таких сложных барьерах следует ожидать усиления роли объемного заряда во внутренних слоях и в связи с этим увеличение роли формы питающего промежутка напряжения.

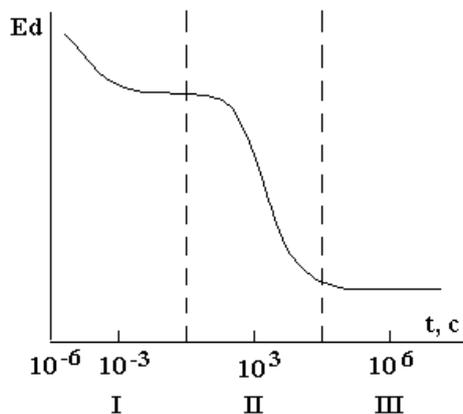


Рис. 3. Зависимость электрической прочности от времени воздействия напряжения: I – импульсное напряжение; II – периодическое напряжение; III – постоянная работа.

### Выводы

1. Применена простая модель барьерного разряда.
2. Показана важность такого параметра барьера, как сопротивление утечки или потерь, который наряду с общепризнанным влиянием частоты питающего напряжения играет важную роль в эффективности систем с барьерным разрядом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Техника высоких напряжений: теоретическое и практические основы применения. MANFRED BEYER и др. М., 1989.

Поступила 16.01.2002

### Summary

The given activity is dedicated to dielectric barriers in a field of a flat air interval. The barriers were investigated with the purpose of obtaining the greatest distributed current with allowance for of stability to a voltage breakdown.