

## ВРЕМЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПРОБОЯ В ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

М. Н. ЛИСЕЦКАЯ, Т. А. ЖЕНЧЕНКО

(Представлена научным семинаром НИИ ВН)

Данные по времени разряда и скорости его развития могут явиться материалами для суждения о механизме пробоя. Современные теории электрического пробоя твердых диэлектриков не рассматривают процесс разряда в пространстве и времени. Процесс пробоя отождествляется с началом ударной ионизации.

Время запаздывания разряда во многих твердых диэлектриках (нитроцеллюлоза, пресшпан, стекло, слюда, фарфор) исследовал Штригель [1]. По экспериментальным данным строилась зависимость  $\frac{n_t}{n_0} =$

$\frac{t}{t_{\text{зап}}}$  в полулогарифмическом масштабе, где  $n_t$  — количество образцов, имеющее данное и меньшее время запаздывания,  $n_0$  — общее количество пробитых образцов. Но его результаты нельзя считать надежными, так как в его опытах не было осциллографирования.

Рядом авторов [2, 3] исследовалось запаздывание разряда в кристаллах щелочно-галогидных солей. Исследованиями К. К. Сончика [2] найдено, что в щелочно-галогидных солях толщиной несколько десятых долей мм времена запаздывания разряда имеют порядок  $10^{-7} \div 10^{-8}$  сек, а средние скорости распространения разряда  $10^5 \div 10^6$  см/сек.

Запаздывание разряда в оргстекле и эпоксидной смоле толщиной  $3 \div 8$  мм в неоднородном поле исследовал Диттмер [4]. Им найдено, что время запаздывания разряда лежит в интервале от единиц до десятков нсек.

Но как известно, только характеристики поведения диэлектрика в однородном поле определяют его электрическую прочность. Поэтому поведение изоляции в однородном поле представляет определенный интерес.

Однако исследование развития разряда в диэлектрике в условиях однородного поля значительно сложнее, чем в неоднородном поле по двум причинам:

- 1) из-за более сильного электрического поля процессы протекают быстрее;
- 2) меньшее межэлектродное расстояние.

То и другое требуют лучшего разрешения во времени от используемой аппаратуры.



В однородном поле в оргстекле толщиной 35 мк М. А. Мельниковым [5] была снята вольт-секундная характеристика при пробое на фронте импульса от  $5 \cdot 10^{-7}$  сек до  $5 \cdot 10^{-9}$  сек. Им было обнаружено упрочнение оргстекла при времени воздействия напряжения  $5 \cdot 10^{-9}$  сек, но время запаздывания в оргстекле было весьма малым и его не удалось измерить.

Поэтому ставится задача измерить запаздывания разряда в твердых изоляционных материалах в диапазоне более коротких времен. Это представляет интерес не только с точки зрения изучения механизма пробоя, но и в связи с развитием и применением наносекундных импульсных генераторов и квантовых генераторов, которые запускаются высоковольтным импульсом наносекундной длительности. Необходимо изучить поведение практической изоляции в этом диапазоне времен.

Для исследования использовались прямоугольные импульсы напряжения с фронтом  $3 \cdot 10^{-9}$  сек. и плоской частью длительностью 100 нсек.

Генератор давал регулируемую амплитуду напряжения до 60 кв.

Более подробное описание установки приводится в [6].

Образцы для исследования времени запаздывания пробоя изготавливались из фторопласта, винипласта, гетинакса. Они вырезались из одного листа соответствующего материала и для этих опытов имели размеры  $35 \times 35 \times 10$  мм. С одной стороны образца делалось специальным приспособлением в сверлильном станке полусферическая лунка так, чтобы толщина образца в самом тонком месте после засверливания равнялась  $0,2 \div 0,3$  мм. Диаметр полусферической лунки был выбран таким, чтобы выполнялось условие однородности поля согласно стандарту:  $R_0 \geq 25d$  и  $D \geq 5d$ , где  $R_0$ —радиус углубления,  $D$ —толщина пластинки материала,  $d$ —толщина образца в самом тонком месте. В наших опытах при  $R_0 = 5$  мм,  $d = 0,1$  мм,  $D_0 = 10$  мм это условие выполнялось. Необходимая толщина образца 0,1 мм достигалась шлифованием плоской стороны образца на наждачной бумаге, а затем на фетре с пастой. Толщина образца измерялась на приборе типа ИЗВ-1 с наименьшей ценой деления 0,001 мм.

В качестве материала электродов применялся порошкообразный графит, который с одной стороны образца запрессовывался в лунку, с другой стороны насыпался на медный плоский электрод диаметром 10 мм и прижимался к плоской части образца.

Образцы пробивались в воздухе. Размеры образцов выбраны достаточно большими и поверхностных разрядов не наблюдалось.

Прежде всего была снята зависимость электрической прочности от вероятности пробоя для всех исследуемых материалов. Для этого на образец подавались прямоугольные импульсы напряжения длительностью 100 нсек с возрастанием амплитуды последующего импульса по сравнению с предыдущим на 10%, пока образец не пробивался. Результаты, полученные при этих испытаниях, представлены на рис. 1.

Затем определялось время запаздывания разряда при определенных значениях напряженности поля. На рис. 2 представлена статистическая обработка времени запаздывания разряда по методике [7], проведенная для 30 образцов из винипласта при напряженности поля, равной 1,2 мВ/см. Также находилось время запаздывания для других материалов и для других напряженностей поля. По этим результатам была построена зависимость времени запаздывания от напряженности поля (рис. 3) для всех исследуемых материалов. Причем при построении точки при самой малой напряженности поля для данного материала не учитывались времена запаздывания, равные и меньшие, чем полученные при следующей напряженности поля. Эти времена



запаздывания получились, по-видимому, при пробое с любых образцов с дефектами.

В наших исследованиях найдено, что время запаздывания пробоя в электроизоляционных материалах мало и лежит в интервале от 20 до 2 нсек. Оно уменьшается с увеличением напряженности поля. Малая

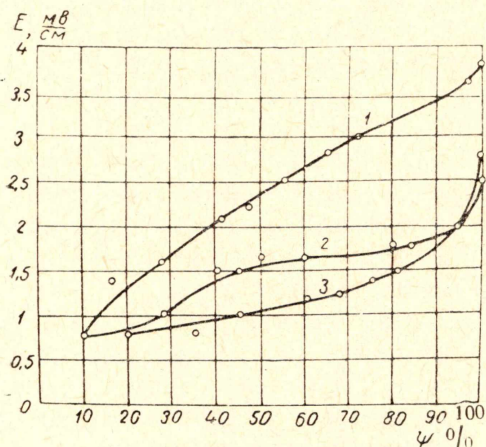


Рис. 1. Зависимость электрической прочности от вероятности пробоя для электроизоляционных материалов. 1 — гетинакс, 2 — винипласт, 3 — фторопласт.

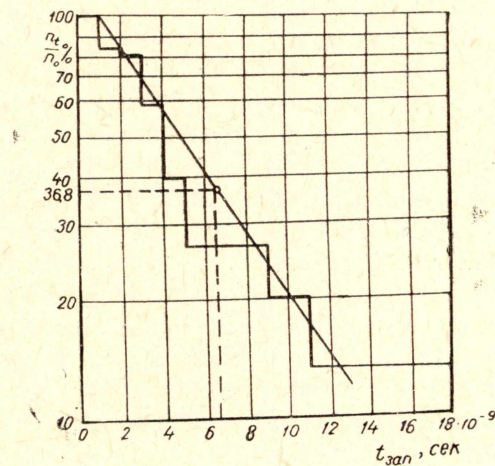


Рис. 2. Статистическая обработка данных по времени запаздывания пробоя для винипласта при  $E = 1,2$  мВ/см.

величина времени запаздывания разряда позволяет сделать вывод о том, что основную долю в общем времени запаздывания разряда играет время формирования. При таком большом диаметре электродов

и материале электродов графита, очевидно, вероятность появления свободных электронов, которая определяет время запаздывания, велика.

Поэтому можно считать, что статистическим временем запаздывания можно пренебречь, а измеренное время запаздывания есть время формирования разряда. Возможно определение средней скорости разряда, как

$$V = \frac{d}{t_{\text{зап}}}, \text{ где } d \text{ — толщина диэлект-}$$

рика,  $t_{\text{зап}}$  — время запаздывания пробоя. При  $E = 1,5$  мВ/см в винипласте  $t_{\text{зап}} = 3 \cdot 10^{-9}$  сек.  $V = 3 \cdot 10^6$  см/сек.

При увеличении напряженности поля время запаздывания уменьшается, а, следовательно, скорость разряда возрастает. Большие скорости разряда свидетельствуют о том, что электрический пробой в твердых диэлектриках является электронным процессом.

Сравнение с развитием разряда в каменной соли [8] показывает, что разряд в твердых электроизоляционных материалах идет с большей скоростью, что можно объяснить большим значением напряженности поля и тем, что кристаллы каменной соли очень хорошо можно просмотреть под микроскопом и исключить отбором образцов наличие

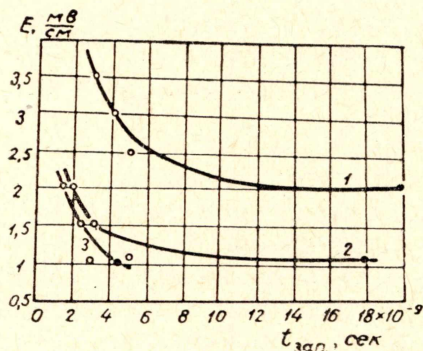


Рис. 3. Зависимость времени запаздывания от напряженности поля для 1—гетинакса, 2—винипласта, 3—фторопласта.



дефектов (инородных включений, пузырьков воздуха, трещин). В непрозрачных диэлектриках этого нельзя сделать.

Но нами [9] проводились исследования в прозрачном оргстекле в однородном поле при толщине 70 мк с графитовыми электродами. Было найдено, что оргстекло обладает большей прочностью по сравнению с исследуемыми материалами. Что можно объяснить меньшим диаметром электродов, а также большей однородностью диэлектрика.

Для оргстекла измеренные величины запаздывания лежат в том же интервале времени, что и для данных диэлектриков, что свидетельствует об аналогии процессов пробоя в этих материалах. Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Время запаздывания разряда в электроизоляционных материалах (винипласт, фторопласт-4, оргстекло, гетинакс) мало и имеет порядок  $2 \cdot 10^{-9} \div 10^{-8}$  сек.

2. Время запаздывания разряда уменьшается с увеличением напряженности поля.

3. Средняя скорость разряда велика,  $3 \cdot 10^6$  см/сек.

4. Большая скорость процесса объясняется электронным характером пробоя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Strigel. Elektrische Stoßfestigkeit, Berlin, 1939.
  2. К. К. Сончик. Диссертация, Томск, 1958.
  3. Y. Jnuishi, T. Suita. J. Inst: El. Eng. Japan, 74, 2, 150, 1954.
  4. B. Dittmer. Arch. f. Electrotechn., В 48, Н-3-5, 1963.
  5. М. А. Мельников. Диссертация, Томск, 1959.
  6. Г. А. Воробьев, М. Н. Лисецкая. ПТЭ, № 3, 1964.
  7. M. Laue. Ann. d. Phys., 76, 261, 1925.
  8. Г. А. Воробьев, М. Н. Лисецкая. ФТТ, № 12, 1964.
  9. М. Н. Лисецкая. Электрический разряд в оргстекле в однородном поле, в печати «Известия высших учебных заведений», серия «Физика», № 5, 1965.
-