



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1127/2-80

18/3-80

9 - 12939

Р.Халлер, Ф.Пецольд

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЛАВСАНОВОЙ ПЛЕНКИ
ПРИ НАГРУЗКЕ ЕЕ ИМПУЛЬСНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ
МАЛОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Направлено в журнал "Электричество"

1980

ВВЕДЕНИЕ

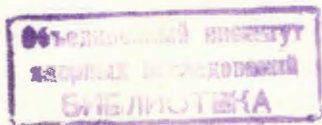
В наносекундной импульсной технике и вообще в ускорительной технике для формирования мощных наносекундных импульсов часто применяются коаксиальные линии^{/1/}. Изоляция таких линий состоит обычно из ферритовых колец и - вследствие относительно малой электрической прочности феррита^{/2/} - из дополнительных жидких или твердых диэлектриков. В качестве твердых диэлектриков нередко используются лавсановые пленки малой толщины. Для выбора оптимальной, т.е. с низким волновым сопротивлением и с большой рабочей напряженностью конструкции такой изоляции должна быть известна электрическая прочность применяемых диэлектриков. В литературе надежных данных по этому вопросу практически нет, поэтому нашей целью было получить статистически обработанные данные по электрической прочности лавсановой пленки при нагрузке ее импульсным напряжением малой длительности.

ТЕХНИКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Импульсные напряжения формировались генератором, который состоял из высоковольтного конденсатора, мощного тиратрона и кабельного трансформатора^{/3/} /рис. 1а/. Если конденсатор С разряжается тиратроном Т на кабельный трансформатор ИТ, то на нагрузочном сопротивлении R возникает отрицательный высоковольтный импульс длительностью ~300 нс/рис. 1б/. Измерение напряжения проводилось осциллографом с помощью омического делителя, а число импульсов до пробоя регистрировалось счетчиком, причем при пробое генератор автоматически отключался.

В качестве образца применялась лавсановая пленка толщиной $d = 20$ мкм. Исследования проводились в однородном поле /электроды плоскость-плоскость с площадью $A_3 = 13$ см² / при частоте повторения импульсов $f = 0,5$ с⁻¹. Образцы пропитывались касторовым маслом и готовились к испытаниям таким образом, чтобы воздушных включений в них практически не было. Для исследования влияния другой пропитки и пауз между повторными импульсами проведены дополнительные эксперименты с пропиткой трансформаторным маслом и при частоте повторения импульсов $f = 25$ с⁻¹.

Статистическая обработка полученных результатов проводилась с помощью логарифмического распределения Гаусса, объем выборки составлял $m = 20$. Испытание заканчивалось по достижении 10^4 импульсов ($f = 0,5$ с⁻¹) и 10^5 импульсов ($f = 25$ с⁻¹), если до этого пробой не появлялся.



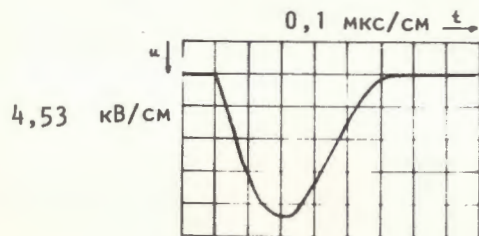
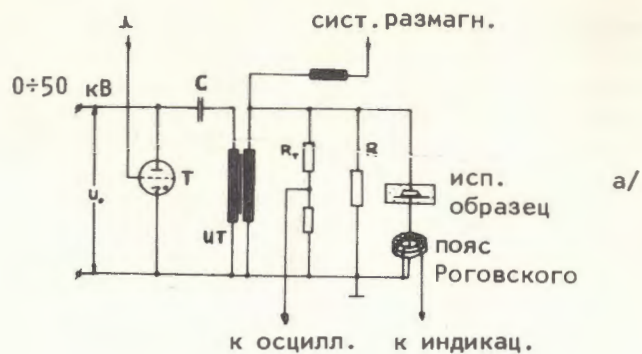


Рис. 1. Высоковольтный генератор. а/ Принципиальная схема, б/ высоковольтный импульс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Зависимость пробивного напряжения от числа импульсов

Исследование зависимости пробивного напряжения от числа импульсов проводилось с изоляцией, состоящей из трех слоев пленки общей толщиной $s_F = 3 \times 20$ мкм. Средние значения эмпирического распределения полученных данных показаны на рис. 2 /кривая а/. Они могут аппроксимироваться в двойном логарифмическом масштабе частично прямыми. Это значит, что, аналогично известным данным по пробоем в твердых диэлектриках при нагрузке длительным напряжением, полученные результаты могут быть описаны выражением

$$\hat{U}_{пр} = K_{пр} \cdot (N_{пр})^{-1/n}, \quad /1/$$

где $n_{(1)} = 10$ при $\hat{U}_{пр} > 11$ кВ, а $n_{(2)} \approx 80$ при $\hat{U}_{пр} \leq 11$ кВ.

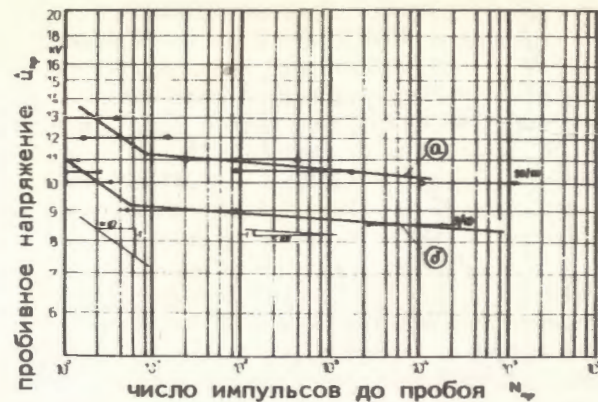


Рис. 2. "Кривая жизни" диэлектрика при различной пропитке и $f = 0,5 \text{ с}^{-1}$: а/ касторовым маслом; б/ трансформаторным маслом.

Оставалось неясным, понизится ли изолирующая способность диэлектрика с повышением числа импульсов по статистическим причинам, или за счет электрического старения*, как, например, при нагрузке длительным напряжением^{/4,5/}. Ответ на этот вопрос можно получить, сравнивая результаты двух опытов, причем в одном случае измерялось пробивное напряжение обычных образцов, в другом исследовались образцы, подвергавшиеся нагрузке малым напряжением^{/6/}. На рис. 3 изображены эмпирические распределения пробивного напряжения, полученные в обоих случаях. Видно, что у обычных образцов среднее значение пробивного напряжения явно выше, чем у образцов, которые подвергались нагрузке 10^4 импульсами при $\bar{U} = 9,5$ кВ и $f = 25 \text{ с}^{-1}$. На основе этого можно утверждать, что лавсановая пленка стареет даже при нагрузке ее импульсным напряжением малой длительности. Полученные результаты можно сравнить с известными моделями по пробоем диэлектрической пленки при нагрузке длительным напряжением^{/5,7/}.

Зависимость пробивного напряжения от пропитки и частоты повторения импульсов

Исследование образцов, пропитанных трансформаторным маслом, показало, что их "кривая жизни" такая же, как и у

* При этом предполагается, что в диэлектрике имеют место необратимые повреждения.

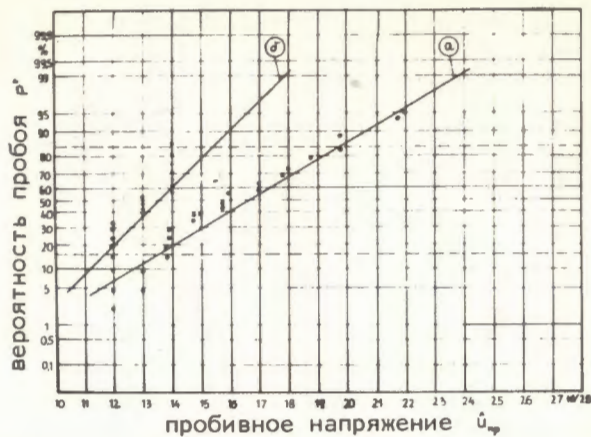


Рис. 3. Эмпирическое распределение пробивного напряжения с предыдущей нагрузкой /б/ и без нее /а/ /пропитка: касторовое масло/.

образцов, пропитанных касторовым маслом, т.е. показатели $n_{(1)} \approx 10$, $n_{(2)} \approx 80$ примерно одинаковы, но коэффициент положения $K_{пр}$ - другой /рис. 2 - кривая б/. Из рисунка видно, что при данном напряжении образцы, пропитанные трансформаторным маслом, пробиваются при меньшем числе импульсов по сравнению с образцами, пропитанными касторовым маслом. Чтобы объяснить это, рассматриваем случай, когда напряжение составляет 11 кВ, а суммарное расстояние между электродами $s = 70$ мкм. При этом величина электрической напряженности в образце имеет следующие значения:

пропитка:	ϵ_r	\hat{E} масло	$\frac{kV}{mm}$	\hat{E} пленка
касторовое масло	4,5	126		162
трансформаторное масло	2,5	208		149

Несмотря на меньшие значения напряженности поля в пленке при пропитке трансформаторным маслом образцы пробиваются при меньшем числе импульсов, чем при пропитке касторовым маслом. Отсюда следует, что пробивные явления, возникающие при этих напряженностях в масляных слоях, оказывают значительное влияние на пробой всей изоляции.

Чтобы оценить влияние частоты повторения импульсов на процесс пробоя, измерения проводились и при $f = 25 \text{ с}^{-1}$. Из рис. 4 видно, что при нагрузке импульсами с частотой повторения $f = 25 \text{ с}^{-1}$, пробивной процесс сходен с процессом, возникающим при $f = 0,5 \text{ с}^{-1}$, так как показатели долговечности диэлектрика /см. /1// примерно одинаковы. Однако при одном и том же напряжении в области $n_{(1)} = 10$ измеряется большее число импульсов до пробоя при $f = 25 \text{ с}^{-1}$, чем при $f = 0,5 \text{ с}^{-1}$, а в области $n_{(2)} = 80$ образцы пробиваются при $f = 25 \text{ с}^{-1}$ уже при меньшем числе импульсов.

Можно предположить, что при $f = 25 \text{ с}^{-1}$, по-видимому, возникающие в изоляции более интенсивные объемные заряды при более высоких напряжениях практически замедляют пробой, а при более низких - ускоряют. Этот факт следует учитывать при конструировании изоляции, подвергаемой импульсной нагрузке с большой частотой повторения импульсов.

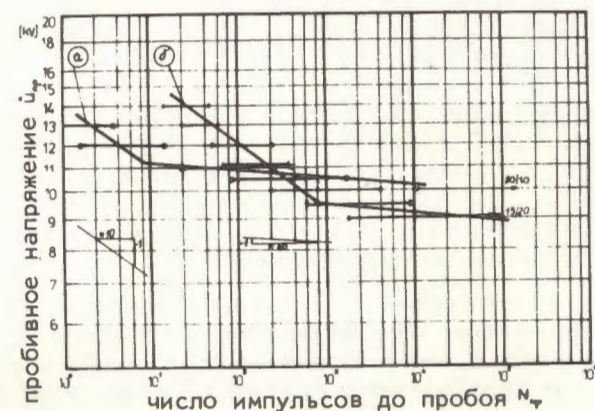


Рис. 4. "Кривая жизни" диэлектрика при различной частоте повторения импульсов: а/ $f = 0,5 \text{ с}^{-1}$, б/ $f = 25 \text{ с}^{-1}$ /пропитка: касторовое масло/.

Зависимость пробивного напряжения от числа пленок

Описанные выше исследования проводились при заданном числе слоев пленки ($N_p = 3$). При конструировании пленочной изоляции необходимо знать также зависимость пробивного напряжения от числа слоев пленки.

С помощью опытов с так называемым "нарастающим напряжением" /скорость подъема $v = 1$ кВ/импульс/ получены эмпирические функции распределения пробивного напряжения при различном числе слоев пленки. Как и ожидалось, средние значения $\hat{U}_{пр}$ растут с увеличением числа слоев /рис. 5/.

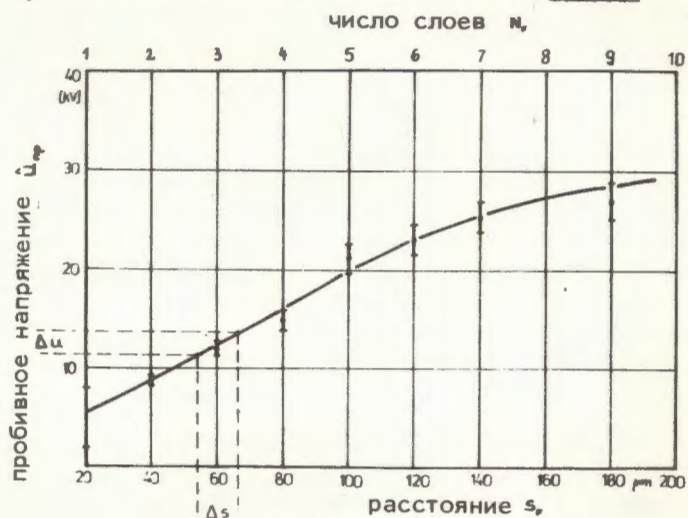


Рис. 5. Зависимость пробивного напряжения от числа слоев пленки /пропитка: касторовое масло/.

Исходя из технологии изготовления пленочной изоляции, можно предположить, что толщина масляных слоев невелика по сравнению с общей толщиной пленки, т.е. суммарное расстояние s между электродами в основном определяется числом применяемых слоев пленки, и полученная кривая $\hat{U}_{пр} = f(N_F)$ дает информацию о зависимости $\hat{U}_{пр} = f(s_F)$. С помощью этой зависимости можно оценить влияние какого-либо отклонения от данной толщины пленки, возникающего при ее изготовлении, и если предположить, например, что толщина изоляции, состоящей из трех слоев пленки, изменяется на $\pm 10\%$, то отклонение среднего пробивного напряжения изменится на ~ 3 кВ /см. рис.5/, что в действительности и наблюдалось.

Если определяется средняя пробивная напряженность $\hat{U}_{пр} / s_F$ в зависимости от s_F , то полученные данные могут аппроксимироваться в двойном логарифмическом масштабе прямой /рис. 6/. Это означает, что, аналогично зависимости $\hat{U}_{пр} = f(N_{пр})$, полученные данные можно выразить показательной функцией

$$\frac{\hat{U}_{пр}}{s_F} = K_{пр s} \cdot (s_F)^{-1/n_s} \quad /2/$$



Рис. 6. Зависимость средней пробивной напряженности от расстояния между электродами /пропитка: касторовое масло/.

Снижение величины средней пробивной напряженности $\hat{U}_{пр} / s_F$ с ростом s_F можно объяснить, как известно, тем, что при данной напряженности вероятность пробоя увеличивается с ростом действующего объема /так называемый "объемный эффект" /7/ /.

ВЫВОДЫ

Исследование электрической прочности изоляции, состоящей из лавсановой пленки, показало, что с повышением числа импульсов снижается ее изолирующая способность. Это снижение может быть описано известным выражением "кривой жизни" диэлектрика /4/ с характерными параметрами: $K_{пр}$ и n . Было установлено, что $K_{пр}$ определяется как средством пропитки, так и частотой повторения импульсов, а значение параметра n составляет $n_{(1)} \approx 10$, $n_{(2)} \approx 80$ в зависимости от напряжения. Кроме того, показано, что средняя пробивная напряженность понижается с увеличением числа применяемых слоев пленки.

Для оптимальной и надежной конструкции изоляции, состоящей из лавсановой пленки, необходимо учитывать как электрическое старение, так и снижение пробивной напряженности с ростом объема пленочной изоляции.

Полученные результаты представляют собой предварительные данные. Для уточнения и объяснения зависимости пробивного напряжения от частоты повторения импульсов и увеличения объема изоляции необходимы дополнительные исследования.

Авторы признательны проф. В.Мошу и проф. В.П.Саранцеву за постановку проблемы и поддержку, а также И.Халлер - за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. "Советское радио", М., 1974.
2. Халлер Р., Красных А.К. ОИЯИ, 9-12448, Дубна, 1979.
3. Месяц Г.А. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. "Энергия", М., 1970.
4. Койков С.Н., Цикин А.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. "Энергия", Л., 1968.
5. Pilling J. Ein Beitrag zur Interpretation der Lebensdauer-kennlinien und zur dielektrischen Bemessung und Pruefung von hochpolymeren Feststoffisolierungen. Diss. B TU Dresden, 1975.
6. Mosch W., Pilling J. Zum Lebensdauerverbrauch bei elektrischer Alterung hochpolymerer Feststoffisolierungen. Wiss.-techn. Mitt, IPR 18/1977.
7. Rueffer K. Zur elektrischen Alterung hochpolymerer Schichtisolierungen. Diss. A TU Dresden, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 декабря 1979 года.