

## ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПРОБОЯ И ИЗОЛЯТОРОВ КООКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

А. Н. Баранов, А. В. Кривоносенко

Твердая электрическая изоляция широко используется в высоковольтных импульсных устройствах различного назначения, где она работает в комбинации с жидкими диэлектриками. При воздействии импульсного напряжения наиболее слабым местом устройства является поверхность изолятора, контактирующая с жидким диэлектриком. Это было отмечено еще в работе [1]. Особо тяжелые условия создаются для изолятора при использовании в качестве жидкого диэлектрика проводящих сред, например воды. Значительные различия  $\epsilon$  и  $\rho$  воды и твердых диэлектриков ведут к сильному искажению электрического поля на границе раздела сред и, как следствие, к низким значениям напряжения поверхностного пробоя (НПП).

Поиску путей повышения НПП изоляторов коаксиальной системы, работающих в воде, посвящен ряд работ [2, 3]. В результате экспериментов установлено, что наибольшее НПП имеют изоляторы с поверхностью, ортогональной оси коаксиальной системы [2]. В воде технической очистки НПП изоляторов из разных материалов и разных форм существенно не отличаются [3].

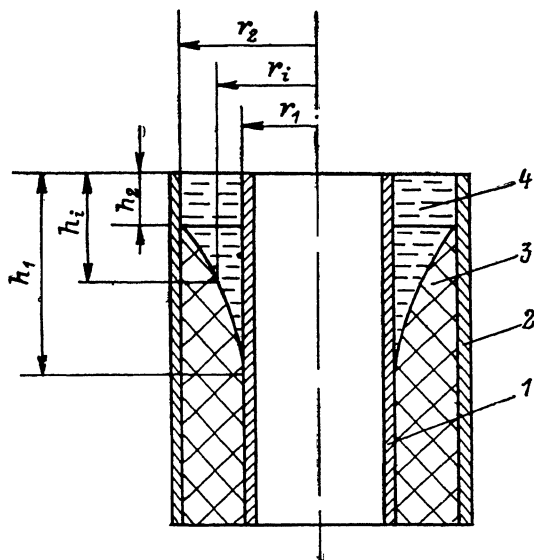


Рис. 1. Конструкция коаксиальной системы с ограниченной длиной электродов.

1 — внутренний электрод, 2 — наружный электрод, 3 — изолятор, 4 — проводящая среда.

Однако эти выводы приемлемы для изоляторов коаксиальных передающих линий. В случае ограниченной длины передающей линии (рис. 1), что имеет место в ряде устройств электротехнологии, имеется возможность значительного повышения НПП изолятора, работающего в технической воде.

Формирование поля в среде осуществляется токами смещения и проводимости. Критерием, определяющим вид тока, является постоянная релаксации среды  $\tau$  [4]

$$\tau = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная среды,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды,  $\rho$  — удельное сопротивление среды.

Для технической воды с  $\rho = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$   $\tau \approx 20 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ . При длительности воздействия импульса напряжения до пробоя, меньшей  $\tau$ , поле формируется токами смещения и его распределение зависит от диэлектрической проницаемости и границ диэлектриков. При длительности воздействия, большей  $\tau$ , поле формируется токами проводимости и его распределение зависит от проводимости и границ контактирующих сред. Используемое в электротехнологии время воздействия импульса напряжения до пробоя обычно больше времени релаксации проводящей среды [5]. В этом случае распределение поля в проводящей среде описывается законом Ома в дифференциальной форме и для коаксиальной системы (рис. 1) в предположении, что ток протекает между электродами в проводящей среде, ограниченной поверхностью изолятора и плоскостью, проходящей через торцы электродов, имеет вид [6]

$$E = j\rho = \frac{I}{2\pi \cdot r_i h_i}, \quad (2)$$

где  $j$  — плотность тока в проводящей среде;  $\rho$  — удельное сопротивление проводящей среды;  $I$  — величина тока в проводящей среде;  $r_i$  — текущий радиус коаксиальной системы;  $h_i$  — расстояние от плоскости, проходящей через торцы электродов при текущем радиусе  $r_i$ , до точки поверхности изолятора.

Из выражения (2) следует, что распределение поля в проводящей среде обусловлено функциональной зависимостью  $h_i = f(r_i)$ . Эта зависимость для различного распределения поля в проводящей среде коаксиальной системы электродов (рис. 1) имеет вид

$$h_i = h_1 \left( \frac{r_1}{r_i} \right)^n = h_2 \left( \frac{r_2}{r_i} \right)^n, \quad (3)$$

где  $h_1$  — высота оголенной части внутреннего электрода;  $h_2$  — высота оголенной части наружного электрода;  $r_1$  — наружный радиус внутреннего электрода;  $r_2$  — внутренний радиус наружного электрода;  $n$  — показатель степени, характеризующий кривизну поверхности изолятора.

Излучение распределения поля методом электрического моделирования в коаксиальной системе электродов с изоляторами, у которых  $n$  принимало значение 0, 1, 2, показало, что

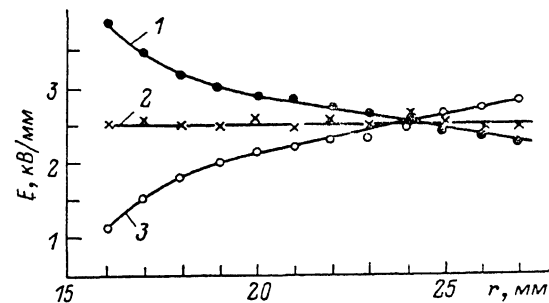


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в коаксиальной системе в зависимости от кривизны поверхности изолятора.

$n$ : 1 — 0, 2 — 1.0, 3 — 2.0.

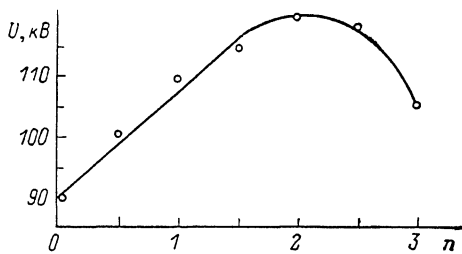


Рис. 3. Зависимость напряжения поверхностного пробоя от кривизны поверхности изолятора.

поверхность изолятора задает распределение поля в проходящей среде. На рис. 2 приведено распределение напряженности поля для указанных  $n$ . Видно, что при  $n=0$  в проводящей среде устанавливается неоднородное поле, обычное для коаксиальной системы.

При  $n=1$  поле в проводящей среде квазиоднородное, а при  $n=2$  распределение поля обратно пропорционально распределению поля в коаксиальной системе.

Очевидно, что поверхность изолятора находится в области перехода от неоднородного поля коаксиальных электродов в теле изолятора к полю в проводящей среде. Задавая поле в проводящей среде обратно пропорционально полю в теле изолятора, можно сформировать на поверхности изолятора квазиоднородное распределение напряженности. В свою очередь это вызывает повышение НПП изолятора.

На рис. 3 приведены результаты исследования влияния закона распределения поля в текущей воде на НПП изоляторов из полиэтилена. Поверхностный пробой изолятора осуществлялся при 100 % вероятности пробоя на фронте косоугольного одиночного импульса напряжения положительной полярности с крутизной фронта до 1000 кВ/мкс. Экспериментальные результаты получены на коаксиальной системе, представленной на рис. 1. Диаметры наружного и внутреннего трубчатых электродов соответственно равнялись 56 и 30 мм. Высота  $h_2$  наружного электрода 5 мм. За НПП принималось среднее арифметическое из 20 отдельных измерений. Среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  составило 15—20 %. Из рис. 3 видно, что с увеличением  $n$  от 0 до 2 при фиксированном  $h_2$  НПП изолятора увеличивается, достигая максимума при  $n=2$ , и при дальнейшем увеличении  $n$  происходит снижение НПП.

Такую зависимость НПП от  $n$  можно объяснить следующим образом. При  $n=0$  поле в проводящей среде неоднородно и соответствует полю коаксиальной системы. Этому соответствует и минимальное НПП изолятора, поскольку его поверхность расположена в неоднородном поле. При  $n=1$  поле в проводящей среде квазиоднородное. Поверхность изолятора расположена в поле более однородном, чем при  $n=0$ . Это вызывает увеличение НПП. При  $n=2$  поле в проводящей среде неоднородно и обратно пропорционально полю в теле изолятора.

Поверхность изолятора в этом случае расположена в квазигодномодном поле, обеспечивая максимальное НПП. При  $n=3$  поверхность изолятора расположена в неоднородном поле, что приводит к снижению НПП.

Таким образом, результаты эксперимента показывают возможность повышения НПП изолятора в 1.2—1.5 раза за счет придания определенной формы его поверхности.

### Список литературы

- [1] Вальтер А. Ф., Инге Л. Д. // ЖТФ. 1932. Т. 11. Вып. 6. С. 582—587.
- [2] Ушаков В. Я., Муратов В. М., Лопатин Б. В. и др. // Электричество. 1980. № 12. С. 56—58.
- [3] Куртеньков Г. Е. // Электронная обработка материалов. 1973. № 6. С. 53—56.
- [4] Губкин А. Н. Физика диэлектриков. М., 1971. 272 с.
- [5] Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Л., 1987. 189 с.
- [6] Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. М.; Л., 1960. 463 с.

Научно-исследовательский институт  
высоких напряжений  
при Томском политехническом институте  
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию  
26 июля 1989 г.

08; 12

Журнал технической физики, т. 60, в. 9, 1990

© 1990 г.

## РАСШИРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА НЕКОЛЛИНЕАРНОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

В. М. Епихин, Ф. Л. Визен

Важнейшим параметром акустooптического фильтра (АОФ), работающего в качестве дисперсионного элемента спектрометра, является диапазон спектральной перестройки  $\lambda_1 - \lambda_2$ , обусловленный полосой управляющих частот  $f_1 - f_2$ . Из основных соотношений для АОФ, полученных в [1-3], следует, что при условии нормальной дисперсии материала светозвукопровода АОФ ( $dn/d\lambda < 0$ , где  $n$  — показатель преломления) относительный спектральный диапазон классического АОФ в принципе не может превышать величины относительного частотного диапазона

$$\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} < \frac{f_2 - f_1}{f_1} = \frac{\Delta f}{f_1}. \quad (1)$$

Последняя обычно ограничена добротностью системы светозвукопровод—связующий слой—электроакустический пьезопреобразователь (ПП)—ВЧ электрический тракт. Увеличение полосы  $\Delta f$  — серьезная техническая задача, для ее решения необходимо совершенствование технологии изготовления ПП и электрических схем его согласования с ВЧ генератором. Дополнительные трудности возникают при  $\Delta f/f_1 \geq 2$  и связаны с возникновением паразитных полос пропускания спектрометра («духов»), обусловленных кратными гармониками ВЧ генератора. На практике относительная частотная перестройка обычно не превышает октаву, т. е.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} < \frac{\Delta f}{f_1} < 2.$$

Возникает вопрос, можно ли расширить спектральный диапазон АОФ, не увеличивая полосу рабочих частот и оставляя в силе требование большой угловой апертуры [2]. Цель данной работы — показать возможность создания АОФ, в котором относительный спектральный диапазон значительно (приблизительно в два раза) превышает относительный частотный диапазон (при этом неравенство (1) нарушается), рассмотреть основные характеристики такого фильтра и его особенности.