

# ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ВО ВРЕМЕНИ И В ПРОСТРАНСТВЕ ДЕСТРУКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

© В.В.Конотоп, О.Л.Резинкин, М.М.Резинкина

Харьковский политехнический университет,  
310013 Харьков, Украина  
(Поступило в Редакцию 4 апреля 1994 г.)

Топология и динамика развития пространственных структур, образуемых областями диэлектрика, разрушенными под воздействием частичных разрядов, могут быть описаны и смоделированы при помощи физических объектов, получивших название фрактальных кластеров. Из литературы известны численные модели, описывающие развитие в диэлектриках фрактальных образований при таких электрофизических явлениях, как разряды шаровых молний [1], электрические разряды в жидкости [2] и твердом теле [3,4], пробой по поверхности диэлектрика [5] и т.п. В основу такого моделирования положены разбиение всего объема диэлектрика на отдельные ячейки и изучение стохастического процесса роста кластера, состоящего из ячеек, перешедших из диэлектрической в проводящую фазу. При этом вероятность пробоя ячейки полагается зависящей от уровня напряженности приложенного к ней электрического поля. Однако данные модели рассматривают процессы разрушения диэлектриков вне привязки к временному масштабу и без учета свойств диэлектрических материалов. Для исследования динамики развития во времени процессов разрушения изоляции предлагается ввести опосредованную зависимость вероятности пробоя ячейки от напряженности приложенного к ней электрического поля. Пробытыми будем полагать ячейки с минимальными значениями прогнозируемых времен до пробоя. Эти времена можно определить с помощью генератора случайных чисел, вид которого зависит от рассчитанного уровня напряженности электрического поля ячейки и определяется из эксперимента.

Известно, что времена до пробоя различных образцов твердой изоляции могут существенно отличаться. Эксперименты показали, что подобный разброс ресурсов характерен и для микрообъемов твердых диэлектриков. С целью имитации неоднородности распределения ресурсных свойств по объему рассматриваемого образца изоляции каждой из ячеек в данном математическом эксперименте ставится в соответствие равномерно распределенное на интервале  $[0,1]$  случайное число  $F_{i,j,k}$  (где  $i = 1, \dots, I$ ;  $j = 1, \dots, J$ ;  $k = 1, \dots, K$ ;  $I, J, K$  — число разбиений исследуемой области по осям  $x, y$  и  $z$  соответственно). Величины диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{i,j,k}$  и удельной проводимости  $\gamma_{i,j,k}$  ( $i, j, k$ )-ячеек считаем равными  $\varepsilon$  и  $\gamma$  диэлектриков, из которых состоит рассматриваемая комбинированная изоляция.

Произведем расчет распределения напряженности трехмерного электрического поля в исследуемой области методом конечных разностей. После завершения расчета поля для каждой из ячеек с помощью генератора квазислучайных чисел, вид которого определяется

экспериментально найденным распределением времени жизни ячейки при рассчитанном значении напряженности электрического поля, вычисляется ожидаемая величина ее ресурса  $T_{i,j,k}$ . В качестве стартовых при определении  $T_{i,j,k}$  используются вышеупомянутые случайные числа  $F_{i,j,k}$ . Затем производится поиск ячейки, соответствующей минимальному значению произведения  $T_{i,j,k} \cdot \Pi_{i,j,k}^{l-1}$ , где  $\Pi_{i,j,k}^{l-1}$  — массив поправочных коэффициентов, введенный для учета степени выработки ресурса элементарных ячеек при воздействии на них электрического поля в течение времени, предшествующего  $l$ -му временному слою ( $l = 0, 1, 2, \dots$ ). Выражение для  $\Pi_{i,j,k}^{l-1}$  выводится из следующих соображений. В общем случае на каждом временном слое ячейка существует при разной напряженности электрического поля, а значит, при одном и том же стартовом числе  $F_{i,j,k}$  имеет различные величины ожидаемого ресурса  $T_{i,j,k}$ . Долю выработки ресурса ячейки к  $l$ -му временному шагу определим как отношение величины шага  $T_{\text{ш } l-1}$  к ожидаемому ресурсу данной ячейки с учетом его выработки на предыдущих временных шагах  $T_{i,j,k} \cdot \Pi_{i,j,k}^{l-1}$ . Окончательно рекуррентную формулу для вычисления  $\Pi_{i,j,k}^l$  получим в виде

$$\Pi_{i,j,k}^l = \Pi_{i,j,k}^{l-1} \cdot \left( 1 - \frac{T_{\text{ш } l-1}}{T_{i,j,k} \cdot \Pi_{i,j,k}^{l-1}} \right),$$

где  $\Pi_{i,j,k}^0 = 1$ ;  $T_{\text{ш } l-1} = \min\{T_{i,j,k} \cdot \Pi_{i,j,k}^{l-1}\}$  — величина шага по времени;  $T_{i,j,k}$  — ресурс элементарной ячейки, не подвергавшейся воздействию электрического поля.

Ячейки с минимальными уровнями  $T_{i,j,k} \cdot \Pi_{i,j,k}^{l-1}$  считаются поврежденными, и соответствующие им значения  $\varepsilon_{i,j,k}$  и  $\gamma_{i,j,k}$  заменяются на величины, характерные для проводящих сред.

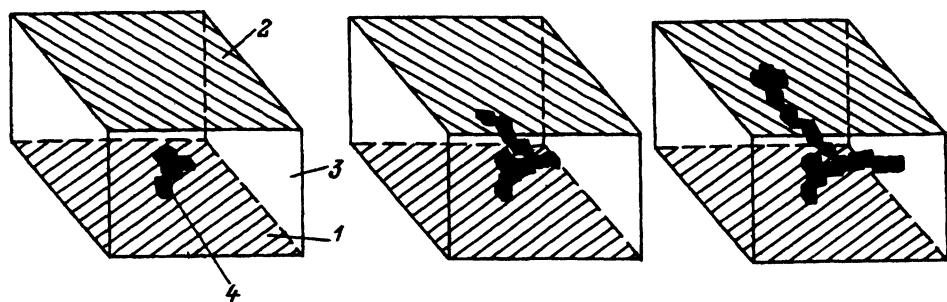
Затем происходит проверка наличия проводящего пути, соединяющего электроды расчетной системы. В том случае, если такой путь найден, расчет прекращается, и текущее время  $t_l = \sum T_{\text{ш } l}$  считается временем жизни изоляционного промежутка в целом. Если же замыкания электродов не обнаружено, то происходит исследование состояния системы на следующем временном слое. С этой целью вновь повторяются все перечисленные операции, начиная с расчета распределения напряженности электрического поля в промежутке при соответствующем новому временному слою расположению пробитых ячеек. Данный алгоритм реализован в виде программы для IBM PC.

Вследствие того что количество поврежденных ячеек с каждым новым выполнением описанного алгоритма возрастает, через некоторое число шагов по времени в изоляционном промежутке появляется проводящий путь, замыкающий электроды системы. Сумма величин всех рассчитанных до этого момента временных шагов моделирует время жизни исследуемой системы в данном численном эксперименте. Каждый набор стартовых чисел  $F_{i,j,k}$  имитирует ресурсные свойства определенного образца изоляции. Разработанная программа, производя многократное выполнение численных экспериментов для разных наборов чисел  $F_{i,j,k}$ , позволяет набрать статистику и построить функции распределения ресурса для рассматриваемого изоляционного промежутка.

N	% пробоев (расчет)		Данные [6]	
	закрайна	зона под обкладками	закрайна	зона под обкладками
4	55	45	50	50
6	88	12	90	10
8	90	10	90	10

Компьютерное моделирование электрического старения диэлектриков позволяет оценить вероятности пробоя различных зон изоляции и априорно выявить слабые места, характерные для данной конструкции. Была проведена серия расчетов времен жизни пропитанной конденсаторной бумаги, расположенной между плоскими обкладками, не содержащими и содержащими закраину, при различном числе ее слоев  $N = 4, 6, 8$ . В качестве исходных данных для работы модели были использованы результаты экспериментов на микрообъемах ( $V = 0.25 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$ ) бумаги КОН-2-10, пропитанной конденсаторным маслом. Расчет времени до пробоя для каждого из  $N$  проводился 80–110 раз при различных наборах стартовых чисел  $F_{i,j,k}$ , характеризующих распределенные случайным образом свойства диэлектрического материала. В результате получены распределения вероятностей времен до пробоя для зон, содержащих и не содержащих закраину, при различных  $N$ . По этим распределениям с помощью метода Монте-Карло определяются пары времен до пробоя  $t_3$  и  $t_0$  областей, в которые входит ( $t_3$ ) или не входит закраина ( $t_0$ ). В том случае, если в данном численном эксперименте  $t_3$  было меньше, чем  $t_0$ , пробой полагался происшедшим на закраине, в противном же случае — наоборот. Такие численные эксперименты продолжались до тех пор, пока изменение соотношения числа пробоев под обкладками и на закраине не прекращалось в пределах заданной точности счёта. Результаты расчета представлены в таблице. Сравнение рассчитанного количества пробоев под обкладками и на закраине с известными экспериментальными данными [6] показало их совпадение в пределах 10 %.

а б в



Стадии разрушения изоляции во времени при приложении напряжения вида  $U = U_0 \cdot I(t)$ .

1, 2 — высоковольтный и низковольтный электроды; 3 — изоляция; 4 — пробитые ячейки изоляции;  $t$ , с: а — 1.8, б — 2.3, в — 4.2.

На приведенном рисунке показаны три стадии деструкции изоляции в системе плоских электродов при приложении к ним напряжения вида  $U = U_0 \cdot l(t)$  в различные моменты времени. Рост “дерева” приводит к существенному искажению электрического поля и ускорению процесса пробоя.

### Выводы

1. Разработана численная методика, позволяющая моделировать пространственное и временное развитие процессов электрического старения твердой изоляции.

2. Проведенное сравнение расчетных данных с результатами экспериментов показало, что разработанная модель адекватно описывает процессы электрического старения изоляции конденсаторных секций.

3. Приведен в качестве примера расчет развития во времени и в пространстве процессов деструкции конденсаторной изоляции, расположенной в системе плоских электродов.

### Список литературы

- [1] Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М. : Наука, 1991. 131 с.
- [2] Куперштох А.Л. // Тез. докл. V Всесоюз. школы “Импульсные разряды в конденсированных средах”. Николаев, 1991. С. 56–57
- [3] Фракталы в физике // Под ред. Пьетронеро, Э. Тозатти. М.: Мир, 1988. 670 с.
- [4] Savada Y. et al. // Phys. Rev. 1982. Ser. A. Vol 26. P. 3557.
- [5] Nimeyer L., Pietronero L., Weisman H.J. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. P. 1033.
- [6] Кононов В.В. Основы проектирования высоковольтных импульсных устройств. Харьков, 1973. 140 с.

01;09;10

Журнал технической физики, т. 66, в. 2, 1996

## ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТ КОМБИНАЦИОННЫХ ВОЛН В ДВИЖУЩЕЙСЯ СРЕДЕ ПРИ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВОЛН

© И.А.Колмаков

(Поступило в Редакцию 13 марта 1995 г.  
В окончательной редакции 24 августа 1995 г.)

В работах [1,2] с позиций гидродинамики показано, что при взаимодействии волн в движущейся относительно излучателей первичных акустических волн частот  $\omega_1, \omega_2$  среде наряду с вынужденными волнами комбинационных частот  $\omega_{c,g} = \omega_1 \pm \omega_2$  одновременно возникают собственные волны комбинационных частот, но с отличными от вынужденных частотами  $\tilde{\omega}_{c,g} \neq \omega_{c,g}$ , причем разность между ними  $\Delta\omega = \tilde{\omega}_{c,g} - \omega_{c,g}$  пропорциональна скорости течения среды  $U$  в области взаимодействия первичных волн.

В данной работе на примере волн в плазме будет показано, что и при квантово-механическом описании взаимодействий излучений в