

01; 04

© 1992

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТВЛЕНИЯ И ИСКРИВЛЕНИЯ
КАНАЛА ПРОБОЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Н.И. Петров, Г.Н. Петрова

Известно, что распространение разряда в диэлектриках происходит случайным образом. Траектория канала разряда представляет собою сложную разветвленную картину, изменяющуюся от разряда к разряду. Математическое описание формирования канала разряда, основанное на решении уравнений с учетом микропроцессов, в настоящее время не представляется возможным. Поэтому интересен подход, основанный на описании разряда с помощью теории фракталов [1, 2]. Такой подход позволяет ввести количественные характеристики, определяющие внутренние свойства разряда и объяснить ряд его особенностей, в частности, выявить закономерности появления разветвлений и искривлений канала разряда.

В настоящей работе фрактальная модель пробоя применяется для рассмотрения процесса развития лидерного разряда в газах. С помощью численного моделирования на ЭВМ получены имитационные картины траекторий пробоя для различных значений воздействующего напряжения и изучены их статистические характеристики.

Опишем кратко модель пробоя диэлектриков. Распространение разряда рассматривается как дискретизированный процесс [3]. Разрядный промежуток разбивается координатной сеткой со стороны квадрата, равной длине ступени l . Точки координатной сетки, через которые проходит разряд, принимаются находящимися при потенциале U . Потенциал U равен потенциалу электрода U_0 , уменьшенному на величину падения напряжения вдоль канала. Величина падения напряжения определяется длиной канала и напряженностью электрического поля в канале E_k . Вероятность пробоя связи пропорциональна локальному электрическому полю в области фронта в степени η :

$$\rho \sim E^\eta, \quad \eta > 0. \quad (1)$$

На каждом шаге развития разряда потенциалы U_{ij} в узлах решетки определяются путем решения методом итераций уравнения Лапласа $\nabla^2 U = 0$ по формуле [3]:

$$U_{ij} = \frac{1}{4} [U_{i-1,j} + U_{i+1,j} + U_{i,j-1} + U_{i,j+1}]. \quad (2)$$

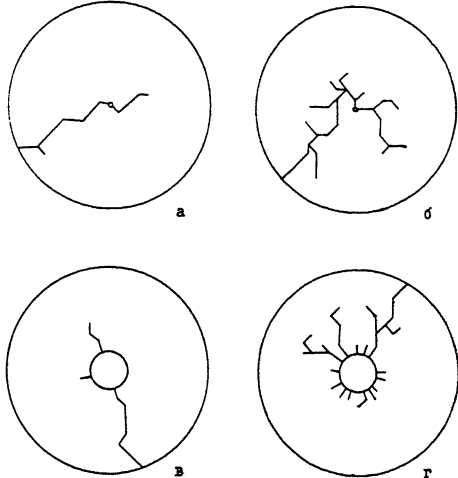


Рис. 1. Типичные картины разряда в коаксиальной системе электродов. а и в - $U_0 = 0.3$ МВ, б и г - $U_0 = 0.8$ МВ.

Аналогичная процедура повторяется до тех пор, пока напряженность поля для всех возможных направлений развития разряда не уменьшится до такой величины, что все вероятности не станут равными нулю. Фрактальную размерность D можно определить, вычисляя число пробитых связей M , содержащихся в сфере радиуса R при различных R [4]:

$$M(R) \sim \int_0^R \rho(r) r^{(d-1)} dr \sim R^D, \quad (3)$$

где d - размерность пространства.

Отсюда следует, что плотность распределения зарядов $\rho(r)$ удовлетворяет закону

$$\rho(r) \sim r^{-(d-D)}. \quad (4)$$

В качестве примера рассматривается коаксиальная геометрия разрядного промежутка с элегазовым наполнением при атмосферном давлении. Напряженность электрического поля в канале принимается равной $E_k = 7$ кВ/см [5], протяженность ступеньки лидера $l = 2$ см, параметр $\eta = 0.25$. Имитационные картины пробоев (рис.1), полученные по описанной выше схеме, воспроизводят основные характерные черты разряда: существование явления остановки разряда, возрастание степени разветвленности при увеличении прикладываемого напряжения, а также форму каналов, по которым происходит пробой. На рис. 1 а и б соответствуют случаю точечного внутреннего

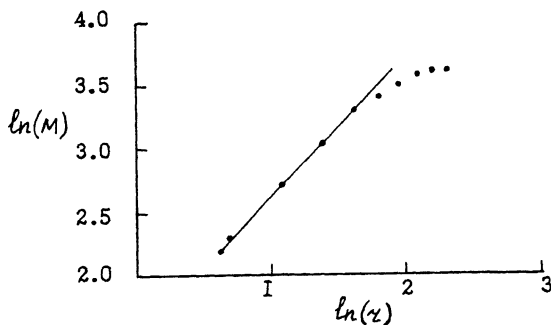


Рис. 2. Зависимость $\ln(M)$ от $\ln(r)$ для случая, изображенного на рис. 1, б.

электрода с радиусом внешнего электрода $R_o = 21$ см при значениях прикладываемого напряжения $U_o = 0.3$ МВ и $U_o = 0.8$ МВ соответственно. На рис. 1, в и г радиус внутреннего электрода равен $r_o = 2$ см. Из рисунков видно, что степень сложности картины, определяющая фрактальную размерность, возрастает с увеличением прикладываемого напряжения. Расчеты показывают, что количество пробитых ступеней линейно растет с увеличением напряжения. При отсутствии перенапряжения пробой может быть как завершенным, так и незавершенным, т.е. имеет вероятностный характер. Так, для случая точечного внутреннего электрода при $U_o < 0.240$ МВ вероятность пробоя $P \approx 0$, а при $U_o \geq 0.248$ МВ $P \approx 100\%$. Значение 50%-го разрядного напряжения равно $U_{50\%} = 0.243$ МВ.

Среднеквадратичное отклонение σ от значения $U_{50\%}$ составляет при этом несколько процентов, причем увеличение радиуса внутреннего электрода приводит к уменьшению σ . Последнее подтверждается экспериментальными данными [6].

Полученные картины и значения напряжений пробоя хорошо согласуются с экспериментальными данными [7]. Увеличение количества ветвей разряда или фрактальной размерности с ростом прикладываемого напряжения было обнаружено также экспериментально в работе [8], где исследовалась импульсная корона на поверхности волн с точечного электрода. Известно, что длина траектории в экспериментах изменяется от разряда к разряду даже при одинаковых начальных условиях. Так, в промежутках длиной 10–25 м вариация длины траектории составила 7–12% от среднего значения [9]. Представляет практический интерес исследование влияния случайности траектории на разброс напряжения пробоя. Рассматриваемая модель позволяет теоретически определять вероятности пробоев промежутков при любом заданном значении напряжения. Это снимает необходимость проведения многократных экспериментальных пробоев. Результаты нетрудно обобщить на 3-мерный случай. Расчеты, проведенные для промежутка стержень–плоскость, показали,

это характер распространения разряда при этом существенно не изменяется.

Количественной характеристикой, сохраняющейся от разряда к разряду при одинаковых начальных условиях, является фрактальная размерность D . Это указывает на ее связь с механизмом формирования траектории лидера, обусловленным внутренними свойствами разряда. Отметим, что явление искривления и ветвления канала пробоя имеет универсальный характер и проявляется также в жидкостях и твердых диэлектриках. Физическая природа такого поведения может быть объяснена наличием нелинейности в системе. Известно [10], что нелинейность в динамических системах может привести к стохастической неустойчивости, имеющей фрактальную природу. В рассматриваемой модели вероятность искривления и ветвления зависит от локального поля, удовлетворяющего уравнению Лапласа. В свою очередь, локальное поле определяется суммой внешнего поля электродов и поля пространственного заряда. Соотношением этих двух полей определяется степень случайности траектории. Действительно, при уменьшении напряжения пространственный заряд, внедренный в промежуток, уменьшается, что и приводит к уменьшению количества ветвей разряда. Нелинейность в данном случае обусловлена воздействием собственного пространственного заряда, внедренного в промежуток, на распространение разряда. На рис. 2 представлена логарифмическая зависимость количества занятых пробоем ступеней от логарифма расстояния для случая, представленного на рис. 1, б. Фрактальная размерность определяется наклоном прямой на рис. 2 и в данном случае равна $D \approx 1.1$.

Фрактальными свойствами обладает также процесс формирования стримерной зоны лидера [11]. Известно [12, 13], что напряженность электрического поля в стримерной зоне сохраняется вдоль всей ее длины. Из уравнения Пуассона и выражения (4) следует, что это имеет место при $\rho(r) \sim r^{-1}$, т.е. при $D = 2$ в 3-мерном случае.

Полученные результаты могут быть использованы в высоковольтной технике, в частности, в акустической диагностике элегазового оборудования. Известно, что энергия акустического излучения определяется зарядом внедряемым в промежуток. Заряд, внедренный за одну ступень, составляет в среднем $q_0 \approx 10^{-7}$ Кл [4]. Поэтому, вычислив количество ступеней M , можно оценить полный заряд Q , внедренный ветвящимся лидером $Q \sim M \cdot q_0 \sim R^D \cdot q_0$, а также размеры области, занятой разрядом.

Таким образом, рассматриваемая модель позволяет исследовать статистические характеристики лидерного разряда, в частности, определить величину статистического разброса напряжения пробоя длинных промежутков, связанную со случайным искривлением и ветвлением траектории. Установлено, что суммарная длина канала пробоя и внедренный пространственный заряд возрастают с увеличением прикладываемого напряжения. Из рассмотренного также следует, что физической причиной, порождающей стохастическую природу процесса пробоя, является нелинейность системы, а не внешние

случайные изменения параметров среды (давления, плотности, температуры).

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] M a n d e l b r o t B. Fractals. Freeman, San Francisco, 1977.
- [2] Фракталы в физике / Под ред. Л. Пьетронеро и Э.Тозатти. М.: Мир, 1988. 672 с.
- [3] N i e m e y e r L., P i o t r o n e r o L., W i e s m a n n H.J. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 52. P. 1033-1036.
- [4] F e d e r J. Fractals. Plenum Press; New York, 1988.
- [5] N i e m e y e r L. 8th Int. Conf. on Gas Discharges. Oxford. 1985. P. 223.
- [6] S c h n e i d e r H., T u r n e r F. // IEEE Trans. on Power Appar. and Syst. 1975. V. 94. N 2. P. 551-559.
- [7] N i e m e y e r L., W i e s m a n n H.J. 5th Int. Symp. on Gas. Dielectrics. Knoxville. 1987 P. 134-139.
- [8] Т о к а р е в А.В., Э н г е л ь ш т В.С. Тез. докл. У Всес. конф. по физике газового разряда. Омск, 1990. С. 202-203.
- [9] Л у п е й к о А.В., П е т р о в Н.И., Ч е р н о в Е.Н. Тез. докл. 1У Всес. конф. по физике газового разряда. Махачкала. 1988. С. 32-33.
- [10] З а с л а в с к и й Г.М., С а г д е е в Р.З. Введение в нелин. физику: От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988. 368 с.
- [11] П е т р о в Н.И. Тез. докл. У Всес. конф. по физике газового разряда. Омск. 1990. С. 200-201.
- [12] Б а з е л я н Э.М., Р а ж а н с к и й И.М. Искровой разряд в воздухе. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с.
- [13] С h e r n o v E.N., L u p e i k o A.V., P e t r o v N.I. 7th Int. Symp. on High Volt. Eng., Dresden, 1991. V. 4. P. 141-144.
- [14] Б о р т н и к И.М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза. М.: Энергоатомиздат, 1988. 80 с.

Поступило в Редакцию
9 декабря 1991 г.