

- [1] *Чередник И.В.* // Функциональный анализ и его приложения. 1978. Т. 12. № 3. С. 42.
- [2] *Кричевер И.М.* // Функциональный анализ и его приложения. 1986. Т. 20. № 3. С. 42.
- [3] *Абдуллоев Х.О., Муминов Х.Х., Максудов А.Т.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 3. С. 180.
- [4] *Елеонский В.М., Кричевер И.М., Кулагин И.Е.* // ДАН СССР. 1986. Т. 287. С. 606.
- [5] *Чередник И.В.* // ДАН СССР. 1980. Т. 252. С. 1104.
- [6] *Дубровин Б.А., Маланюк Т.М., Кричевер И.М., Маганьков В.Г.* // ЭЧАЯ. 1988. Т. 19. № 3. С. 579.
- [7] *Jojima N., Oikawa M.* // Progr. Theor. Phys. 1976. Vol. 56. P. 1719.
- [8] *Makhankov V.* // Phys. Lett. 1974. Vol. 50A. P. 42.
- [10] *Хасагава А., Кодами Ю.* // ТИИЭР. 1981. Vol. 69. С. 57-63.

04
© 1995 г.

Журнал технической физики, т. 65, в. 6, 1995

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ И КАСКАДНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

И.Г.Игнатьев

(Поступило в Редакцию 5 февраля 1994 г.)

Задача определения пробивного напряжения ускорителей прямого действия возникает при оптимизации геометрических параметров электродов высоковольтной структуры, состава и давления изолирующих газов.

Так как форма электродов (кондуктора, градиентных колец и бака) сложна, а их активная площадь превышает сотни квадратных сантиметров, то методы определения пробивного потенциала на основе закона Пашена или методики Бортника [1] в данном случае дают высокую относительную погрешность (как правило, сотни процентов) и расчет носит оценочный характер.

В работе [2] предложен метод, основанный на аппроксимации пробивного напряжения базовой модели ускорителя (для которой пробивное напряжение известно из опыта) на исследуемую конструкцию. Метод позволяет достигнуть точности расчета порядка систематической погрешности эксперимента и особенно эффективен при модернизации уже существующих ускорителей [3]. Недостаток метода — необходимость проведения предварительных экспериментов на базовой модели.

В данной работе предложено определять пробивное напряжение электростатических и каскадных генераторов на основе моделирования главной характеристики высоковольтной структуры — функции

распределения пробивных напряжений. Метод основан на определении вероятности пробоя системы газозолированных электродов путем использования закона преобразования масштаба [4]. Данный метод лишен указанных выше недостатков, его отличает высокая точность и отсутствие необходимости в предварительных экспериментах.

Как показано в работе [2], процессы пробоя элементов высоковольтной структуры ускорителей прямого действия взаимно независимы. Тогда вероятность пробоя системы из $n = 1 \dots N$ электродов, имеющих потенциалы относительно бака U_n , определяется законом преобразования масштаба в форме [4,5]

$$P = 1 - \exp \left(- \frac{1}{A_0} \sum_{n=1}^N \int_{A_n} \exp \left(\frac{x(U_n) - \eta}{\gamma} \right) dA \right), \quad (1)$$

где A_0 — площадь поверхности рабочей зоны системы электродов Роговского, для которой из опыта определяются параметры функции распределения η и γ в однородном поле; x — приведенная напряженность электрического поля на поверхности A_n [4].

Как правило, потенциал электродов меняется линейно от нуля на баке до некоторого значения U_0 на кондукторе, тогда $x(U_n) = x(U_0)$, $P = P(U_0)$. Следовательно, задавая значения U_0 и численно определяя напряженность поля на электродах, можно получить из (1) функцию распределения пробивных напряжений $P(U_0)$ и из нее определить 50%-ый квантиль U_{50} — пробивное напряжение.

Для расчета электрического поля на поверхности электродов предпочтительнее использовать метод интегральных уравнений в виде [6], сводящий решение уравнения Лапласа к решению системы алгебраических уравнений

$$AX = U, \quad (2)$$

где A — матрица коэффициентов, X — вектор приведенной напряженности, $U = [0 \dots U_0]$ — вектор потенциалов.

Тогда в отличие от метода конечных разностей A можно определять только один раз (так как A не зависит от U) и, решая систему (2) для разных U_0 , из (1) получать функции распределения.

Статистический разброс γ и 50%-ый квантиль η в однородном поле для двойного экспоненциального закона зависят от давления газа и могут быть определены исходя из зависимостей, рассмотренных в работе [4].

ЭСУ	Литературная ссылка	Максимальное давление, МПа	Максимальная погрешность расчета U_{50} , %
ЭГ-2.5	[2]	0.8	5
ЭГ-3	[2]	0.8	4
ЭГП-8	[3]	1.0	13
ЭГП-10	[8]	1.4	10
ЭГ-1	[9]	1.0	7

В таблице приведены значения максимальных погрешностей расчета пробивного напряжения U_{50} для некоторых электростатических ускорителей (ЭСУ). Расчет поля выполнен при помощи пакета прикладных программ Laplas-2 [7]. Из таблицы видно, что предлагаемая методика позволяет достигнуть относительной погрешности не более 5% при давлении изолирующего газа до 0.8 МПа и около 10–15% при давлении 0.8–1.5 МПа. Увеличение погрешности расчета при увеличении давления связано с отсутствием достаточно точных экспериментальных данных о поведении γ и η при давлениях свыше 0.8 МПа. В данной работе применялась линейная аппроксимация зависимостей γ и η от давления изолирующего газа при $A_0 = 10 \text{ см}^2$ [10]

$$\gamma = 0.98p_{20}k_y, \quad \eta = 50p_{20}k_y,$$

где p_{20} — давление изолирующей смеси в МПа, приведенное к нормальным условиям (при температуре 20 °С); k_y — коэффициент уменьшения электрической прочности вследствие добавки в элегаз SF₆ азота.

Список литературы

- [1] Бортник И.М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза. М., 1988. 80 с.
- [2] Резвыл А.К., Романов В.А. // Электричество. 1988. № 12. С. 9–19.
- [3] Резвыл К.А. и др. // Тр. X Сессии по электростатическим ускорителям. Обнинск, 1992. С. 148–151.
- [4] Mosch W. et al. // Elektrische, 1983. Bd 37. N 4. S. 176–179.
- [5] Игнатьев И.Г. // Техническая электродинамика, 1993. № 2. С. 10–13.
- [6] Иванов В.Я. Методы автоматизированного проектирования приборов электроники. Новосибирск, 1986. 193 с.
- [7] Игнатьев И.Г. Автореф. канд. дис. Сумы, 1993. 16 с.
- [8] Резвыл К.А., Романов В.А., Алаев В.В. // Тр. XI Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Т. 2. Дубна, 1989. С. 301–304.
- [9] Алмазов В.А. и др. Препринт МГУ. М., 1988. № МГУ-88-015/36. 26 с.
- [10] Mosch W., Hauschild W. Hochspannungsisolierungen mit SF₆. Berlin, 1979. 200 s.