

# Вольт-амперные характеристики униполярного коронного разряда

Х. Ф. ТАММЕТ

Таммет

Поле униполярного коронного разряда описывается уравнениями вида [Л. 1 и 2]:

$$\left. \begin{aligned} \vec{j} &= k\vec{E}\rho; \\ \operatorname{div} \epsilon \vec{E} &= \rho; \\ \operatorname{div} \vec{j} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\vec{j}$  — плотность тока;  $k$  — подвижность ионов;  $\vec{E}$  — напряженность электрического поля;  $\rho$  — плотность заряда;  $\epsilon$  — абсолютная электрическая проницаемость.

Красные условия задают потенциалы электродов и напряженность над коронирующей поверхностью.

Вольт-амперные характеристики не имеют явного выражения в элементарных функциях, а вычисление силы тока короны итерационным способом по трансцендентным уравнениям неудобно и не дает необходимого на практике наглядного представления о вольт-амперных характеристиках.

Идет к нулю, а отношение радиусов электродов  $R/r$  — к бесконечности, то получим:

$$J = \frac{2\pi\epsilon k U^2}{R^2}; \quad (2)$$

$$I = \frac{3\pi\epsilon k U^2}{2R}, \quad (3)$$

где  $J$  — сила тока с единицы длины электрода при цилиндрической геометрии, а  $I$  — сила тока при сферической геометрии.

В общем случае вольт-амперные характеристики можно записать следующим образом:

$$I = C_U \left( \frac{R}{r}, \frac{U_0}{U} \right) \frac{2\pi\epsilon k U (U - U_0)}{R^2}; \quad (4)$$

$$I = S_P \left( \frac{R}{r}, \frac{U_0}{U} \right) \frac{3\pi\epsilon k U (U - U_0)}{2R}, \quad (5)$$

где  $C_U$  и  $S_P$  — специальные функции двух переменных, определенные так, чтобы (4) и (5) точно удовлетворяли уравнениям (1).

В частном случае ( $U_0=0$ ) имеем:

$$C_U \left( \frac{R}{r}, 0 \right) = C_{U_0} \left( \frac{R}{r} \right) = \left( \sqrt{1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2} - \frac{r}{R} \arccos \frac{r}{R} \right)^{-2}. \quad (6)$$

$$S_P \left( \frac{R}{r}, 0 \right) = S_{P_0} \left( \frac{R}{r} \right) = 4 \frac{R}{r} \left( \int_0^{R/r} \sqrt{t^{-1} + t^{-4}} dt \right)^{-2}. \quad (7)$$

В общем случае функции  $C_U$  и  $S_P$  целесообразно распечатать на два множителя:

$$C_U \left( \frac{R}{r}, \frac{U_0}{U} \right) = C_{U_0} \left( \frac{R}{r} \right) C_{U_1} \left( \frac{R}{r}, \frac{U_0}{U} \right); \quad (8)$$

$$S_P \left( \frac{R}{r}, \frac{U_0}{U} \right) = S_{P_0} \left( \frac{R}{r} \right) S_{P_1} \left( \frac{R}{r}, \frac{U_0}{U} \right). \quad (9)$$

Графики функций  $C_{U_1}$  и  $S_{P_1}$  изображены на рис. 1 и 2, где цифры при кривых обозначают отношение  $R/r$ . Функция

$$Pl \left( \frac{U_0}{U} \right) = C_{U_1} \left( 1, \frac{U_0}{U} \right) = S_{P_1} \left( 1, \frac{U_0}{U} \right) = \frac{9 - 12 \left( \frac{U_0}{U} \right)^2 + \sqrt{81 - 216 \left( \frac{U_0}{U} \right)^2 + 192 \left( \frac{U_0}{U} \right)^4 - 48 \left( \frac{U_0}{U} \right)^6}}{18 \left( 1 - \frac{U_0}{U} \right)}. \quad (10)$$

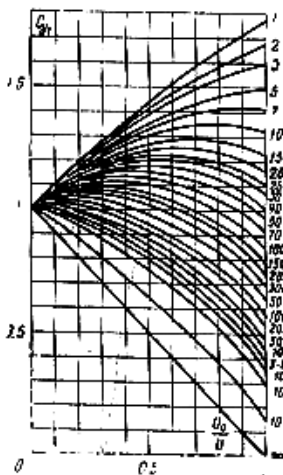


Рис. 1.

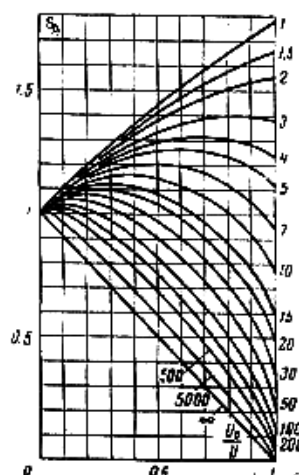


Рис. 2.

В статье приведены практические формулы, которые в рамках обычных допущений представляют собой вольт-амперные характеристики коронного разряда между coaxialными цилиндрами и концентрическими сферами в явной форме.

Решения уравнений (1) имеют простой вид в некоторых предельных случаях [Л. 3]. Если отношение начального напряжения разряда к напряжению между электродами  $U_0/U$  стре-

**Пример 3.** Определить предельную отключающую способность этого же предохранителя при напряжении 380 в ( $\beta = 0,64$ ). Так как значение  $W_{ам}$  при изменении напряжения должно сохраниться, то в соответствии с данными примера 1 получим:

$$4200 = U_0,64 \cdot 2,52 \cdot 100,$$

где  $U$  — искомая ордината кривой  $\frac{W_{ам}}{\beta}$  при  $\beta = 0,64$ . Находим  $U = 26,1$  и по кривой рис. 3  $I_7 = 11$ , откуда в соответствии с (6) определяем  $I \approx 2800$  а.

## Литература

1. Кузнецов Р. С., Аппараты распределительных устройств низкого напряжения, Госэнергоиздат, 1962.
2. Крымский Г. А., Об эквивалентности испытаний предохранителей на переменном и постоянном токе, «Вестник электропромышленности», 1959, № 3.
3. Baxter H. W., Calculated Curves of Inductive Energy of Start of Arcing in Fuses, London, 1950.

[11.9.1973]



может быть использована для вычисления плотности тока униполярной короны между плоскопараллельными электродами:

$$j = Pl \left( \frac{U_0}{U} \right) \frac{9ekU(U-U_0)}{8h^2}, \quad (11)$$

где  $h$  — расстояние между электродами.

В некоторых случаях могут быть использованы приближенные формулы:

$$C_{\mu_0} \left( \frac{R}{r} \right) \approx \left( 1 + \frac{1,04}{\frac{R}{r} - 1} \right)^3; \quad (12)$$

$$S_{\rho_0} \left( \frac{R}{r} \right) \approx \begin{cases} 3 \left( \frac{R}{R-r} \right)^2 - 1,45 \left( \frac{R}{r} - 1 \right)^{-1,71} - 2 \text{ при } \frac{R}{r} \leq 2; \\ \left[ 1 - 1,12 \sqrt{\frac{r}{R}} + 0,1 \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]^{-2} \text{ при } \frac{R}{r} \geq 2; \end{cases} \quad (13)$$

$$C_V \left( \frac{R}{r}, \frac{U_0}{U} \right) \approx a^2 \left[ 1 + (b-1) \frac{U_0}{U} + 0,9b(1,85-b) \frac{U_0}{U} \left( 1 - \frac{U_0}{U} \right) \right], \quad (14)$$

где  $a = 1 + 1,04 / \left( \frac{R}{r} - 1 \right)$ ;  $b = 4/\ln \left( \frac{R}{r} + 9 \right)$ .

Ошибка при использовании формулы (12) не превышает 0,5% (в области  $R \geq 21r - 0,1\%$ ), а при использовании формулы (13) не превышает 0,15% (в области  $R \geq 2r - 0,1\%$ ). Поправки в процентах к формуле (14) указаны в таблице. В этой же таблице показаны поправки в процентах к приближенным формулам Тиходеева [Л. 2] и Таунсенда, которые соответственно равносильны выражениям:

$$C_V \left( \frac{R}{r}, \frac{U_0}{U} \right) \approx \left( 1 - \frac{U_0}{U} \right) [1 + c + c(1+c) \ln(1+1/c)], \quad (15)$$

где

$$c = \frac{2U_0}{(U-U_0) \ln \frac{R}{r}}; \quad C_V \left( \frac{R}{r}, \frac{U_0}{U} \right) \approx \frac{4}{\ln \frac{R}{r}}. \quad (16)$$

Расчетная формула	Поправки к расчетным формулам, %						
	$U_0/U$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
(14)	1	0,0	1,1	1,5	1,8	2,1	2,3
	10	0,2	-0,6	-1,7	-2,2	-2,2	-2,4
	10 <sup>2</sup>	0,0	0,3	-1,4	-1,9	-1,0	-1,2
	10 <sup>3</sup>	0,0	0,8	-0,6	-0,7	0,9	-0,2
	10 <sup>4</sup>	0,0	0,9	0,0	0,4	2,3	0,0
	10 <sup>6</sup>	0,0	1,0	0,9	2,0	4,6	0,0
	∞	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(15)	1	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	10	39,1	20,5	17,3	15,0	11,7	5,9
	10 <sup>2</sup>	3,2	1,8	3,2	4,5	4,7	0,1
	10 <sup>3</sup>	0,3	0,8	2,1	3,6	4,7	0,0
	10 <sup>4</sup>	0,0	0,6	1,6	3,1	4,5	0,0
	10 <sup>6</sup>	0,0	0,3	1,1	2,3	4,1	0,0
	∞	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(16)	1	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	10	-19,9	-7,2	1,1	6,2	8,1	5,9
	10 <sup>2</sup>	18,8	30,2	31,7	27,6	18,1	0,1
	10 <sup>3</sup>	73,2	78,5	70,6	55,9	34,3	0,0
	10 <sup>4</sup>	130,3	126,7	108,8	83,4	49,8	0,0
	10 <sup>6</sup>	245,4	222,1	183,5	136,4	79,5	0,0
	∞	∞	∞	∞	∞	∞	—

Подробный вывод представленных формул можно найти в [Л. 3], где дополнительно рассмотрены все предельные режимы и представлены четырехзначные таблицы функции  $C_V$  и  $S_p$ . В этой работе формула Тиходеева ошибочно приписана Дюпюи, который фактически лишь цитировал результат Н. Н. Тиходеева [Л. 2].

Литература

1. Попков В. И., К теории униполярной короны постоянного тока, «Электричество», 1949, № 1.
2. Тиходеев Н. Н., Дифференциальное уравнение униполярной короны и его интегрирование в простейших случаях, «Журнал технической физики», 1955, т. 25, № 8.
3. Таммет Х. Ф., Вольт-амперные характеристики идеальной униполярной квазикороны, Ученые записки Тартуского государственного университета, вып. 239, 1969.

[3.7.1970]



НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ЭНЕРГИЯ»

Теоретические основы электротехники. Под ред. Г. И. Атабекова. В 3-х ч. Ч. 1. Атабеков Г. И. Линейные электрические цепи. Учебник для вузов. Изд. 4-е. 1970. 592 с. 1 р. 29 к. В перепл.

Теоретические основы электротехники. Под ред. Г. И. Атабекова. В 3-х ч. Ч. 2. Атабеков Г. И., Тимофеев А. Б., Хухриков С. С., Нелинейные цепи. Учебник для вузов. Изд. 3-е, испр. 1970. 232 с. 64 к. В перепл.

Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. 1970. 432 с. 1 р. 58 к. В перепл.

Виноградов Н. В. Производство электрических машин. Учебное пособие для студентов специальности «Электрические машины и аппараты» высших учебных заведений. 1970. 288 с. 1 р. 50 к. В перепл.

Дусавицкий Ю. Я. Магнитные стабилизаторы постоянного напряжения. 1970. 88 с. (Б-ка по автоматике. Вып. 403). 31 к.