

К ОЦЕНКЕ МОЩНОСТИ В КАНАЛЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

И. И. КАЛЯЦКИЙ, Ю. Н. ЛЕОНТЬЕВ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
высоких напряжений)

Процессы, происходящие при импульсном электрическом пробое диэлектрической среды, подобны процессам, возникающим при взрыве зарядов конденсированных взрывчатых веществ. Исследованиями импульсного разряда в газах [4, 6, 7, 8] показано, что процессы при расширении канала разряда могут быть описаны на основе законов гидродинамики. Ударные волны, возникающие при электрическом пробое среды, в определенных условиях могут привести к разрушению твердой среды. Ударные волны, возникающие при импульсном электрическом пробое, характеризуются давлением на фронте движущейся волны.

В работе А. С. Зингермана [3] показано, что величина давления на фронте ударной волны при импульсном разряде зависит от крутизны фронта импульса, удельного энергосодержания в канале разряда и плотности среды. Развиваемая в канале искры мощность является одним из основных параметров, которые определяют разрушающее действие импульсного разряда в диэлектрической среде. От величины мощности, развиваемой в канале, зависит давление на фронте ударной волны и, в конечном итоге, взрывное действие импульсного разряда. При импульсном пробое твердых диэлектриков в канале разряда развивается мощность, которая может достигать при определенных условиях $10^8 \div 10^9$ вт [2].

Предельная мощность в канале при разряде в газах, по исследованиям С. И. Андреева [1], не превышает 50 мвт, т. е. на порядок ниже, чем при импульсном пробое в твердых диэлектриках.

Как известно, мощность в канале импульсного разряда определяется при неизменных условиях пробоя (L, C, U, W_0) величиной сопротивления канала разряда — $R_k(t)$. В работе [1] показано, что при импульсном пробое газов сопротивление канала разряда очень быстро спадает до определенной величины и затем остается почти неизменным до конца первого полупериода колебания тока. Активное сопротивление разрядного контура может быть на несколько порядков меньше минимального сопротивления канала искры. Величина мощности в канале разряда определяется сопротивлением — $R_k(t)$.

Рассмотрим изменение мощности в канале импульсного разряда при различном сопротивлении — $R_k(t)$.

Рассматривая колебательный режим работы разрядного контура с параметрами (R, L, C) в послепробойный период, мы имеем следующие соотношения:

Величина тока в разрядном канале

$$I = \frac{U_0}{\omega L} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t), \quad (1)$$

когда

$$R < 2 \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где $\alpha = \frac{R}{2L}$ и $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}},$

L — индуктивность разрядного контура,

R — активное сопротивление разрядного контура,

C — разрядная емкость контура.

Величина первого максимума тока может быть определена

$$I_m = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp \left[- \frac{m \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{m^2}{4}}}{2 \sqrt{1 - \frac{m^2}{4}}} \right], \quad (2)$$

где

$$m = \frac{R}{R_{\text{опт}}},$$

$R_{\text{опт.}}$ — для разрядного контура с параметрами (L, C, R) величина постоянная и равна

$$R_{\text{опт.}} = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

т. е. волновому сопротивлению контура. Время, при котором ток в канале разряда будет максимальным, определится, по выражению

$$\tau_m = \frac{\sqrt{LC} \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{m^2}{4}}}{\sqrt{1 - \frac{m^2}{4}}}. \quad (3)$$

Примем, что время максимума мощности и время максимума тока, как будет показано экспериментально ниже, совпадают

$$\tau_m(I) = \tau_m(N).$$

Исходя из этого, максимальная мощность в канале импульсного разряда

$$N_m = I_m^2 \cdot R_k, \quad (4)$$

где R_k — сопротивление канала импульсного разряда. Используя (2) и (4), получим

$$N_m = \frac{U_0^2 C}{L} \cdot R_k \cdot f^2(m)$$

или

$$N_m = \frac{2 W_0 \cdot R_k}{L} \cdot f^2(m), \quad (5)$$

где W_0 — полная энергия импульса и

$$f^2(m) = \exp \left[- \frac{m \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{m^2}{4}}}{\sqrt{1 - \frac{m^2}{4}}} \right].$$

Кривая зависимости $f^2(m)$ представлена на рис. 1. Максимально возможная (предельная) мощность, которая может быть в канале импульсного разряда с сопротивлением R_k , будет иметь место при

$$R_k = R_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

т. е. при $m = 1$. В этом случае, как видно из графика рис. 1, $f^2(m) = 0,3$. Исходя из этого, предельная мощность в канале разряда может быть выражена

$$N_{\pi} = 0,6 \frac{W_0}{\sqrt{LC}}. \quad (6)$$

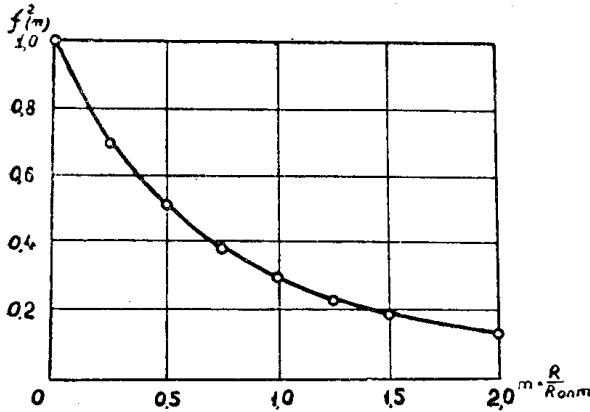


Рис. 1. Графическая зависимость функции $f^2(m)$.

рядного контура (R , L , C) и энергии импульса W_0 оценить максимальную мощность в канале разряда и проследить за ее изменением при различных значениях

$$m = \frac{R}{R_{\text{опт}}}.$$

Максимальная мощность в канале разряда может быть выражена в относительных единицах

$$\frac{N_{\text{м}}}{N_{\pi}} = \frac{2 \cdot m}{0,6} \cdot f^2(m). \quad (7)$$

Кривая зависимости $\frac{N_{\text{м}}}{N_{\pi}} =$

$f(m)$ представлена на рис. 2. Из графика рис. 2 видно, что при любых значениях $m \neq 1$ отношение максимальной мощности в канале к предельной мощности всегда меньше единицы

$$\frac{N_{\text{м}}}{N_{\pi}} < 1.$$

При любых значениях $R \geq R_{\text{опт}}$ мощность в канале импульсного разряда всегда меньше предельной

$$N_{\text{м}} < N_{\pi}.$$

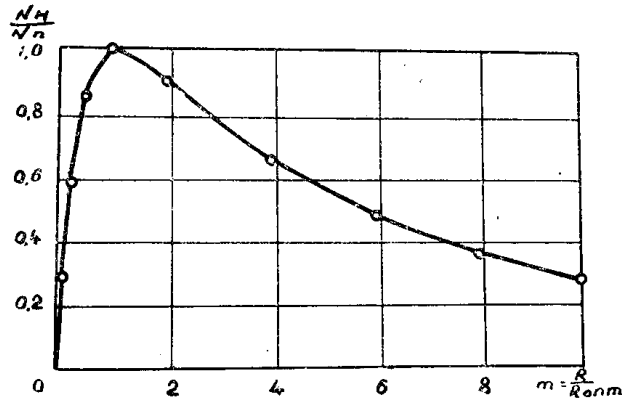


Рис. 2. Изменение относительной мощности в канале разряда при различных отношениях активного сопротивления к волновому сопротивлению контура.

При $m \leq 2$ мы имеем

$$R \leq 2R_{\text{опт}}, \quad R \leq 2 \sqrt{\frac{L}{C}},$$

т. е. условия колебательного режима контура, следовательно, левая ветвь кривой на рис. 2 соответствует колебательному режиму работы контура.

При $m \geq 2$ мы имеем

$$R \geq 2R_{\text{опт}}, \quad R \geq 2 \sqrt{\frac{L}{C}},$$

т. е. правая ветвь кривой рис. 2 соответствует аperiodическому режиму контура.

Полученную зависимость $\frac{N_m}{N_n} = f(m)$ можно для практических оценок мощности в канале импульсного разряда с удовлетворительной точностью представить в виде эмпирической формулы

$$\frac{N_m}{N_n} = 1,18 \cdot m \left(e^{-\frac{m}{8}} - e^{-3m} \right) \quad (8)$$

или

$$N_m = 0,707 \cdot m \cdot \frac{W_0}{\sqrt{L \cdot C}} \left(e^{-\frac{m}{8}} - e^{-3m} \right). \quad (9)$$

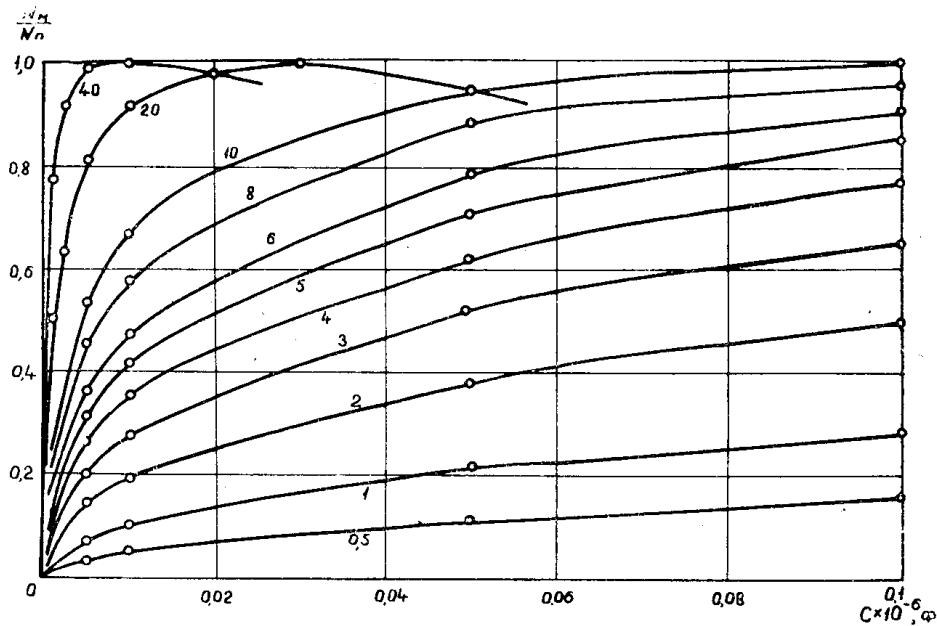


Рис. 3. Изменение относительной мощности в канале разряда при различной разрядной емкости в контуре.

Данные на графике рис. 1 и рис. 2 и формулы (6), (7) при наличии зависимости сопротивления канала от величины перенапряжения при пробое

$$R_k(t) = f \left(\frac{U_m}{U_{\text{пр}}} \right).$$

могут быть использованы для оценки мощности, развиваемой импульсным разрядом в канале, при пробое диэлектрической среды.

На рис. 3 приведена зависимость относительной мощности от величины разрядной емкости $\frac{N_m}{N_n} = f(c)$ для различных значений R_k . Из данных рис. 3 видно, что оптимальное значение относительной мощности смещается в сторону меньших „С“ при увеличении сопротивления — R_k . Эти кривые получены расчетным путем для условий импульсного пробоя $U_0 = 240 \cdot 10^3$ в, $L = 16,5 \cdot 10^{-6}$ гн.

Вышеизложенная методика оценки максимальной мощности, развиваемой в канале импульсного разряда, была использована для сравнения расчетных значений с данными, полученными экспериментально.

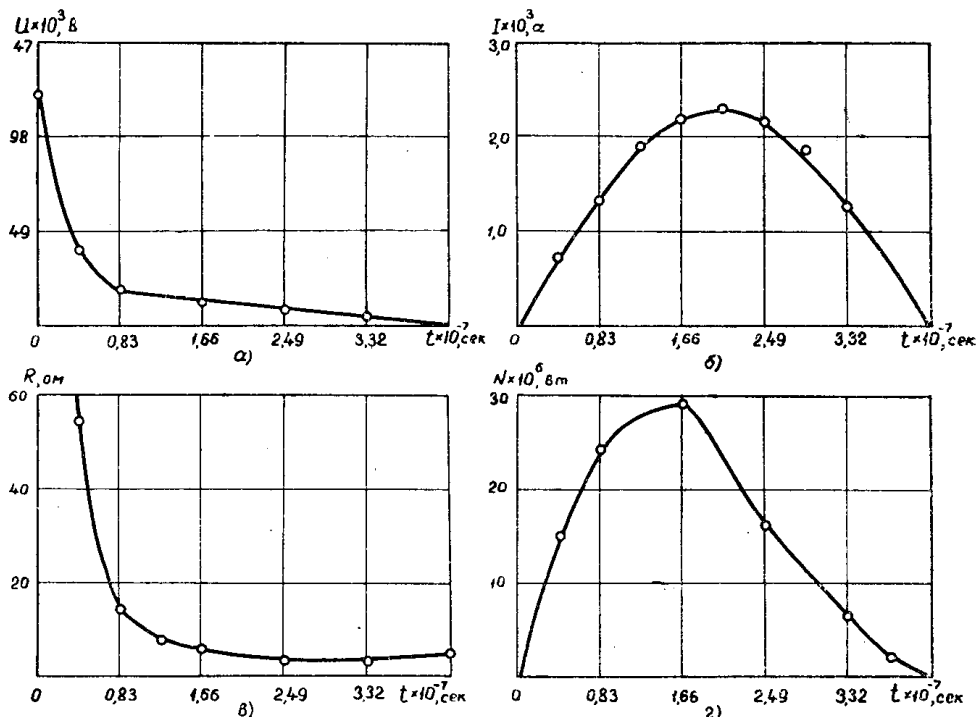


Рис. 4. Изменение параметров канала разряда за время первого полупериода колебаний тока:

- а) напряжение — $U(t)$, б) ток — $I(t)$, в) сопротивление канала — $R_k(t)$, г) мощность в канале разряда — $N(t)$.

На рис. 4 показано изменение напряжения — $U(t)$, тока в канале разряда — $I(t)$, сопротивления канала — $R_k(t)$ и мощности в канале — $N(t)$ при импульсном электрическом пробое парафина толщиной $d = 1,5$ см. Емкость в разряде при этом была $C = 0,00166 \cdot 10^{-6}$ ф., индуктивность контура $L = 10,5 \cdot 10^{-6}$ гн, напряжение $U_0 = 240 \cdot 10^3$ в и энергия импульса $W_0 = 48$ втсек. Для этих условий пробоя парафина предельная мощность $N_n = 218$ мвт.

Как видно из данных рис. 4, максимальная мощность, определенная по осциллограммам $U(t)$ и $I(t)$, в этом случае $N_m = 28 \cdot 10^6$ вт, а минимальное сопротивление канала $R_k = 3$ ом. На рис. 4 также видно, что время максимума мощности мало отличается от времени максимума тока.

Если использовать минимальное значение сопротивления канала разряда $R_k = 3 \text{ ом}$ и оценить $\frac{N_m}{N_n}$ по (7), то мы получим

$$\frac{N_m}{N_n} = 0.12 \quad N_m = 0.12 N_n,$$

$$\text{т. е. } N_m = 26,1 \cdot 10^6 \text{ вт},$$

что удовлетворительно совпадает с опытными данными.

Выводы

1. Рассмотрена методика оценки максимальной мощности, развиваемой в канале разряда по известным параметрам разрядного контура. Предложена эмпирическая формула для оценки максимальной мощности в канале по величине отношения минимального сопротивления канала разряда к волновому сопротивлению контура.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Андреев. Диссертация «Мощный искровой разряд наносекундной длительности и его излучение». Гос. ордена Ленина оптический институт им. С. И. Вавилова, Москва, 1962.
2. И. И. Каляцкий, А. Г. Синябрюхов. Энергетика, № 3, 1963. Изв. высш. учебн. завед.
3. А. С. Зингерман. ЖТФ, т. 26, в. 11, 2539, 1956.
4. С. И. Драбкина. ЖЭТФ, т. 21, в. 4, 473, 1951.
5. Ю. В. Скворцов, В. С. Комельков, Н. М. Кузнецов. ЖТФ, т. 30, в. 10, 1165, 1960.
6. Н. М. Гегечкори. ЖЭТФ, т. 21, в. 4, 493, 1951.
7. И. С. Абрамсон, Н. М. Гегечкори, С. И. Драбкина, С. Л. Мандельштам. ЖЭТФ, т. 17, 862, 1947.
8. Г. Г. Долгов, С. Л. Мандельштам. ЖЭТФ, т. 24, в. 6, 1953.