

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКА КАНАЛЬНОЙ СТАДИИ ДЛИННОЙ ИСКРЫ НА МОДЕЛИ

Студентка ЩЕРБАКОВА Н. А.

Руководитель профессор доктор И. С. Стекольников

(Представлено научным семинаром по диэлектрикам)

Работы ряда авторов дали подробный материал для количественной характеристики процесса лидерной, канальной и дуговой стадий высоковольтного разряда, получаемого от генератора импульсных напряжений.

Полученные результаты выявили ряд зависимостей амплитуды тока канальной стадии искры от тормозного сопротивления длины разрядного промежутка, сопротивления заземления токоприемника, а также связь между амплитудой тока и максимальной крутизной волны тока.

Однако до последнего времени не было сделано попытки рассчитывать параметры тока длинной искры. Для решения этого вопроса необходимо, оказалось, иметь расчетную схему, соответствующую представлению о физических явлениях, протекающих в высоковольтном разряде.

В лаборатории высоковольтного газового разряда энергетического института АН СССР была осуществлена модель схемы замещения канальной стадии длинной искры, предложенная И. С. Стекольниковым.

Расчет схемы замещения был произведен ранее сотрудником этой лаборатории М. А. Тюминой. Численные значения модели выбраны на том основании, что процессы в схеме замещения канальной стадии могут быть описаны уравнениями длинной линии [1]:

$$\frac{\partial U_{ориг}}{\partial x_{ориг}} = R_{ориг} i_{ориг} + L_{ориг} \frac{\partial i_{ориг}}{\partial t_{ориг}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial i_{ориг}}{\partial x_{ориг}} = C_{ориг} \frac{\partial U_{ориг}}{\partial t_{ориг}}.$$

Для модели схемы замещения справедливы те же уравнения:

$$\frac{\partial U_{мод}}{\partial x_{мод}} = R_{мод} i_{мод} + L_{мод} \frac{\partial i_{мод}}{\partial t_{мод}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial i_{\text{мод}}}{\partial x_{\text{мод}}} = C_{\text{мод}} \frac{\partial U_{\text{мод}}}{\partial t_{\text{мод}}}.$$

Для того, чтобы процессы в двух случаях были подобны, необходимы условия подобия:

$$\begin{aligned} \frac{U_{\text{ориг}}}{U_{\text{мод}}} = U_0; \quad \frac{x_{\text{ориг}}}{x_{\text{мод}}} = x_0; \quad \frac{R_{\text{ориг}}}{R_{\text{мод}}} = R_0; \quad \frac{i_{\text{ориг}}}{i_{\text{мод}}} = i_0, \\ \frac{L_{\text{ориг}}}{L_{\text{мод}}} = L_0; \quad \frac{t_{\text{ориг}}}{t_{\text{мод}}} = t_0; \quad \frac{C_{\text{ориг}}}{C_{\text{мод}}} = C_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $R_{\text{ориг}}, R_{\text{мод}}, C_{\text{ориг}}, C_{\text{мод}}, L_{\text{ориг}}, L_{\text{мод}}$ — сопротивление, емкость и индуктивность на единицу длины оригинала и модели.

Используя соотношения (3), выражаем все величины, входящие в уравнение (2), через величины уравнения (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_{\text{ориг}}}{\partial x_{\text{ориг}}} = \frac{R_{\text{ориг}} U_0}{R_0 x_0} \cdot \frac{i_{\text{ориг}}}{i_0} + \frac{L_{\text{ориг}} U_0 t_0}{L_0 x_0 i_0} \cdot \frac{di_{\text{ориг}}}{dt_{\text{ориг}}}, \\ \frac{\partial i_{\text{ориг}}}{\partial x_{\text{ориг}}} = \frac{L_{\text{ориг}} i_0}{L_0 x_0} \cdot \frac{t_0}{U_0} \cdot \frac{\partial U_{\text{ориг}}}{\partial t_{\text{ориг}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения (1) и (2) отражают подобные процессы только в том случае, если уравнение (4) совпадает с уравнением (1), а для этого необходимо, чтобы между величинами, характеризующими явление и модель, выполнялись следующие соотношения:

$$\frac{U_0}{R_0 x_0 i_0} = 1, \quad (5)$$

$$\frac{U_0 t_0}{L_0 x_0 i_0} = 1, \quad (6)$$

$$\frac{L_0 x_0 U_0}{i_0 t_0} = 1. \quad (7)$$

$\frac{U_0}{i_0} = R_0 x_0$ исключается из уравнений (6) и (7), тогда получается два критерия подобия:

$$\frac{t_0}{C_0 x_0^2 R_0} = 1, \quad (8)$$

$$\frac{t_0 R_0}{L_0} = 1, \quad (9)$$

где C_0, t_0, x_0, R_0, L_0 — коэффициенты подобия.

Полученные соотношения (8) и (9) являются искомыми критериями подобия. Поскольку число неизвестных коэффициентов пять, а уравнений два, то три коэффициента можно задать произвольно.

Задаем:

$$C_o = 1, L_o = 1, x_o = \frac{1}{k} = \frac{1}{3500}. \quad (10)$$

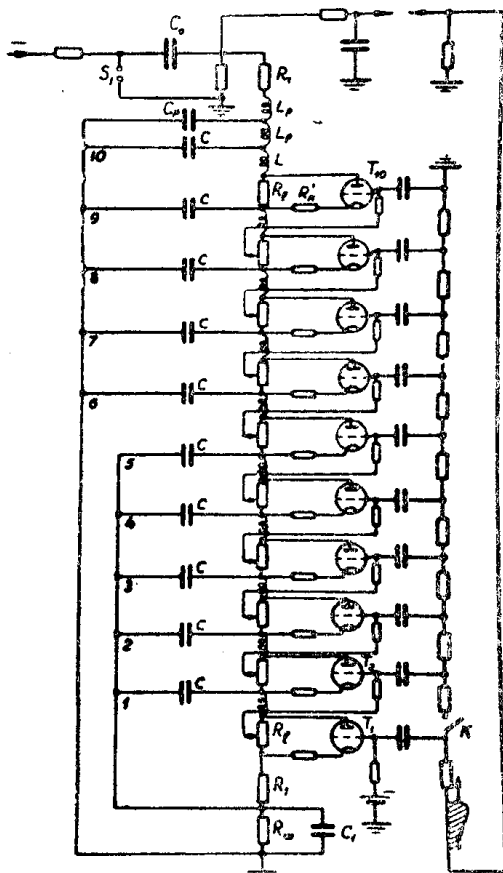
Тогда из критериев подобия находятся R_o и t_o :

$$R_o = \frac{1}{x_o} = k; t_o = \frac{1}{R_o}; t_o = x_o = \frac{1}{3500}. \quad (11)$$

Исходя из условий (10), (11) и условий подобия (3), находим связь между полным сопротивлением канала искры оригинала и модели $R_{ориг\ полн} = R_{ориг} x_{ориг} = R_{мод} R_o x_{мод} \cdot x_o = R_{мод} k x_{мод} \cdot \frac{1}{k} = R_{мод} x_{мод} = R_{мод\ полн}$.

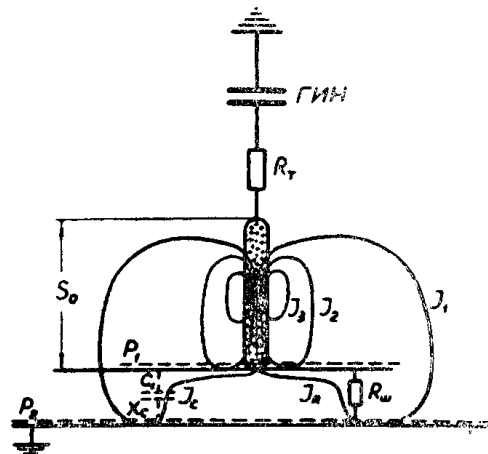
Аналогично: $C_{ор\ полн} = C_{ор} x_{ор} = C_{мод} C_o x_{мод} x_o = \frac{C_{мод} x_{мод}}{k} = \frac{1}{k} C_{мод\ полн}$; и $L_{ор\ полн} = \frac{1}{k} L_{мод\ полн}$.

Изображенная на фиг. 1 схема приближенно моделирует процессы в разрядном промежутке типа „стержень-плоскость“ [2].



Фиг. 1. Схема моделирования разряда стержень-плоскость.

Канал искры здесь замещен цепочной схемой из „ n “ ячеек, каждая из которых состоит из самоиндукции L , представляющей индуктивность канала искры, C — емкости канала относительно заземленной плоскости (P_2) и измерительной плоскости (P_1) и R_l — активного сопротивления канала в лидерной стадии. (фиг. 2). Параллельно R_l включены тиратроны, назначением кото-



Фиг. 2. Схематическое распределение тока в главном канале

рых является шунтировать в соответствующие моменты времени R_l другими сопротивлениями, характерными для конца канальной или дуговой стадии искры.

Емкость C_p и две самоиндукции L_p , включенные в начале цепочки, моделируют емкость и индуктивность верхнего электрода и подводящих к нему проводов. Последовательное включение тиратронов имитирует продвижение головки канальной стадии длинной искры. Через сопротивление $R_{ш}$ и конденсатор C_1 , моделирующий емкость между плоскостями P_1 и P_2 , будет протекать ток лишь от второй группы ячеек, что соответствует составляющей тока I_1 (фиг. 2). Наличие C_1 существенно уменьшает ток в $R_{ш}$.

Целью данного исследования было получение на модели волны канального тока, совпадающей по своим параметрам с волной канального тока оригинала для заданных условий в искровом промежутке, и исследование ряда зависимостей между отдельными параметрами для искры. К числу последних относятся следующие зависимости:

1. Зависимость амплитуды канального тока от величины сопротивления заземления (или сопротивления токоприемника).
2. Изучение зависимости амплитуды канального тока от величины емкости ячеек цепочечной схемы.
3. Зависимость времени фронта волны канального тока от емкости ячеек.
4. Зависимость амплитуды канального тока и времени фронта волны от величины емкости высоковольтного электрода ($I_k = f(C_p)$) и $I_k = f(n_1/n_{II})$.

5. Определение соотношения $I_{R_1}/I_{R_{ш}}$. Исследование на модели указанных зависимостей имеет ценность прежде всего потому, что большинство из них или вообще не представляется возможным исследовать на оригинале, или представляет большую экспериментальную трудность. С другой стороны, их исследование представляет интерес в связи с выяснением представлений о самом процессе главного разряда. Выяснение отношения $I_{R_1}/I_{R_{ш}}$ (I_{R_1} —полный ток, снятый с сопротивления $R_1 = 10 \text{ ом}$), представляет интерес в связи с высказанными соображениями И. С. Стекольниково о разделении тока главного разряда на несколько составляющих.

Выяснить зависимость амплитуды канального тока от величины C_p , емкости высоковольтного электрода, тоже не представляется возможным для искры, так же как и зависимость времени фронта волны канального тока от C_p .

Первоначально на модели были выбраны параметры, соответствующие следующим данным оригинала: $S_0 = 2 \text{ м}$; $U_0 = 1100 \text{ кВ}$; $R_T = 1500 \text{ ом}$; $L = 1,3 \text{ мкГн/м}$; $C = 1,43 \cdot 10^{-11} \text{ ф/м}$; $R_k = 200 \text{ ом/м}$ (сопротивление канала); исследуемый промежуток—стержень—плоскость при положительной полярности стержня. Форма волны канального тока для оригинала выбрана по осциллограмме, полученной на оригинале при вышеуказанных параметрах (фиг. 3).

Параметры волны тока для оригинала: $I_{лmax} = 335(375) \text{ а}$; $I_{R_{ш}} = 648 \text{ а}$; $I_{дуг} = 570(575) \text{ а}$; $T_{ф} = (0,076) \text{ мксек}$; $T_{имп} = (0,22) \text{ мксек}$.

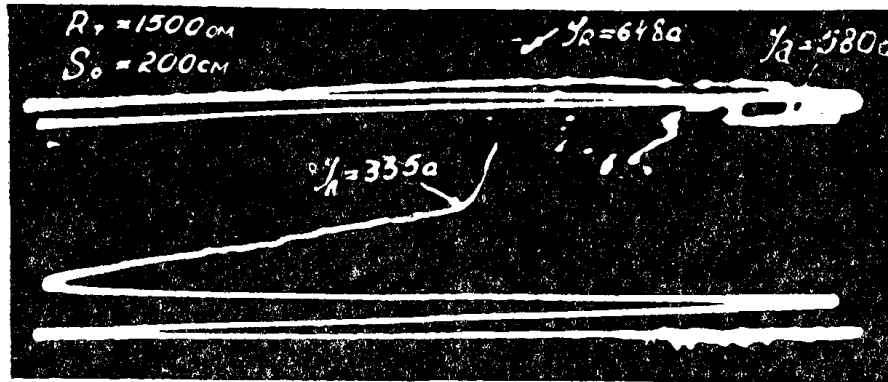
В скобках приведены средние значения параметров, полученные из обработки большого количества осциллограмм, причем ток $I_{R_{ш}}$ взят полный, т. е. сумма токов канального и лидерного.

Исходя из критериев подобия выбраны параметры модели: $C_{мод} = 3500 C_{ориг}$; $L_{мод} = 3500 L_{ориг}$; $R_{мод} = R_{ориг}$; $t_{мод} = 3500 t_{ориг}$, где $C_{ориг}$, $R_{ориг}$, $L_{ориг}$ —соответственно емкость, сопротивление и индуктивность оригинала. Модель отображает разряд с момента касания головки лидера плоскости.

Емкость C_p для оригинала подсчитана по формуле цилиндрического конденсатора. Если считать, что стержень является внутренним цилиндром радиусом $r_1 = 0,5 \text{ см}$ и длиной $S = 2 \text{ м}$, стены зала будут

внешним цилиндром радиусом $r_2 = 7$ м. Емкость подсчитана по формуле:

$$C_{D \text{ orig}} = \frac{\epsilon S}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{200}{2 \ln \frac{7000}{5}} = 1,53 \cdot 10^{-11} \text{ ф.}$$



Фиг. 3. Осциллограмма волны канального тока для оригинала.

Для модели $C_p = 0,053$ мкф нами была выбрана $C_p = 0,05$ мкф. Индуктивность стержня определена как индуктивность прямолинейного провода диаметром $d = 1$ см и длиной $S = 2$ м

$$L_p = \frac{\mu_0 S}{2\pi} \left(\ln \frac{2S_0}{r} - 0,75 \right) \text{ H}; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7};$$

$$L_p = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ H.}$$

Для модели $L_{p \text{ мод}} = 8400$ мкГн нами выбрана $L_{p \text{ мод}} = 9000$ мкГн.

Итак, параметры модели для вышеуказанных параметров оригинала:

$$L_{яч} = 900 \text{ мкГн}; \quad C_{яч} = 0,01 \text{ мкф}; \quad R_l = 150 \text{ Ом};$$

$$R_k = 40 \text{ Ом}; \quad R_T = 1500 \text{ Ом}; \quad R_{ин} = 51 \text{ Ом};$$

$$R_1 = 10 \text{ Ом}; \quad C_p = 0,05 \text{ мкф}; \quad L_p = 9000 \text{ мкГн}; \quad C_1 = 2,1 \text{ мкф},$$

где $L_{яч}$, $C_{яч}$, R_l , R_k — величины, рассчитанные на одну ячейку цепочной схемы. Сопротивление R_k складывается из омического сопротивления R_k' , сопротивления $R_{тип} = f(I)$ и омического сопротивления индуктивности $R_L = 10$ Ом.

Сопротивление канала для оригинала можно подсчитать по формуле:

$$R_k = \frac{U_0}{I_0} - R_T = \frac{1100 \cdot 10^3}{578} - 1500 = 400 \text{ Ом},$$

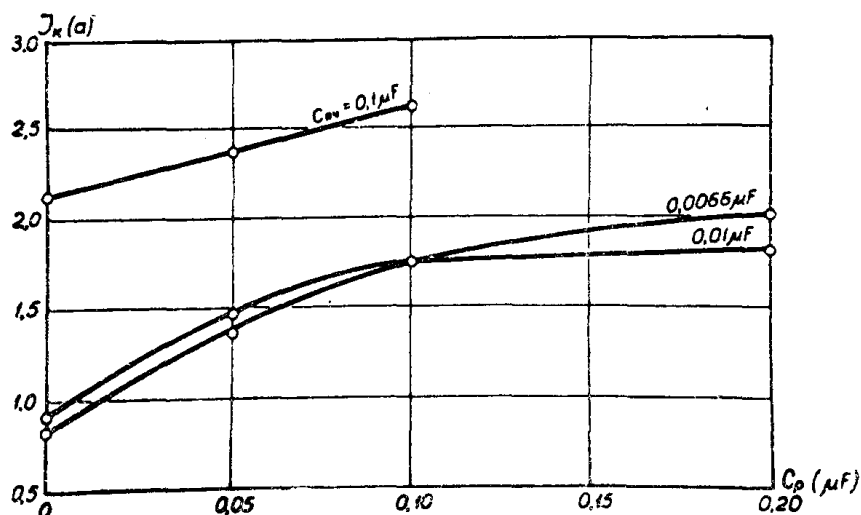
где

R_k — общее сопротивление канала в дуговой стадии. Срабатывание тиратронов происходило последовательно снизу вверх, ключ „К“ разомкнут, но средняя скорость включения была большей, чем средняя скорость продвижения головки канала в длинной искре.

При параметрах схемы $U_0 = 5,25$ кВ, $U_n = 6,36$ в (напряжение накала тиратрона), $C_p = 0,05$ мкф, $C_{яч} = 0,01$ мкф, $R_{ш} = 51$ ом, $R_1 = 10$ ом, $R_k = 17$ ом; $n_1/n_{II} = 5/5$ получена на модели волна со следующими параметрами: $I_L = 1,57$ (330) а, $I_k = 1,57$ (330) а, $I_0 = 2,69$ (565) а. В скобках даны величины, пересчитанные на оригинал. Расхождение с оригиналом не превышает 2%.
 Как было выяснено на оригинале, через $R_{ш}$ проходит лишь составляющая полного тока. На модели полный ток, снятый с $R_1 = 10$ ом, в 2,25 раза больше канального тока, протекающего через шунт.

Для выбранной волны на модели был получен ряд зависимостей:

1. Зависимость тока главного канала от C_p при различных $C_{яч}$ (фиг. 4). Зависимость $I_k = f(C_p)$ в действительности на оригинале по-



Фиг. 4. Зависимость $I_k = f(C_p)$ при различных $C_{яч}$.

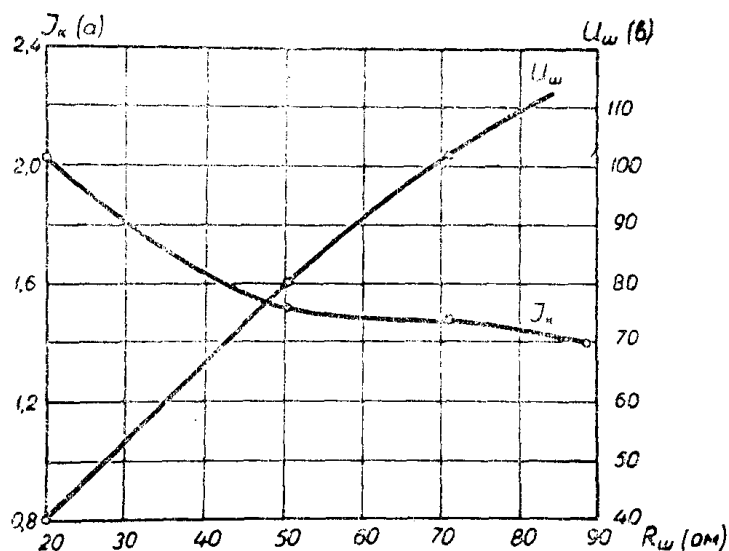
лучить невозможно, так как незначительное увеличение геометрических размеров высоковольтного электрода, что ведет к увеличению емкости C_p , почти не дает изменения канального тока. Так как фронт волны канального тока формируется в первый момент развития канала, то разряд этой емкости не должен влиять на время фронта, что было доказано и на модели. При значительном увеличении емкости канала ($C_{яч}$) (фиг. 4) амплитуда канального тока резко возрастает, что также невозможно установить на оригинале.

2. С помощью модели воспроизведены некоторые особенности явления канальной стадии, обнаруженные на оригинале. Так, например, модель отображает зависимость $I_k = f(R_{ш})$ (фиг. 5), которая хорошо согласуется с оригиналом.

Модель дает возможность установить более точную зависимость канального тока (тока молнии) от величины сопротивления заземления, что необходимо знать для решения вопроса о грозозащите линий электропередач. Вторая кривая (фиг. 5) изображает зависимость падения напряжения на $R_{ш}$, по которой можно определить, какой процент напряжения от общего приходится на шунт.

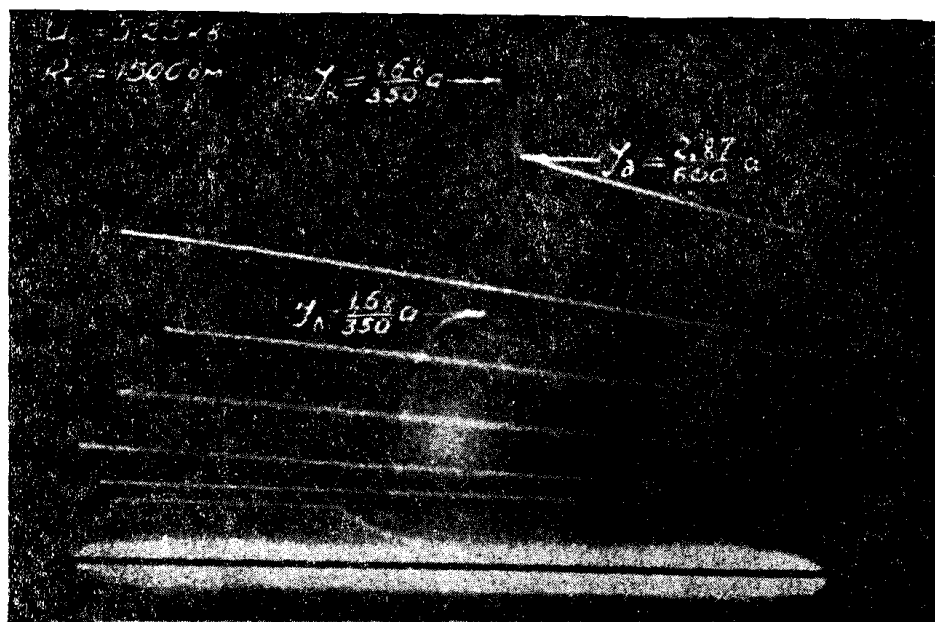
Эти эксперименты дают возможность считать, что при ударе молнии в опору линии электропередач коэффициент передачи напряжения на вершину опоры за счет падения напряжения от разрядного тока на сопротивление заземления опоры (в нашем случае $R_{ш}$) составляет 3—4%.

При одновременном включении всех тиратронов (ключ „К“ замкнут) величина амплитуды канального тока при синхронном включении превышает величину амплитуды канального тока при последовательном включении тиратронов на 12%, время фронта при этом умень-



Фиг. 5. Зависимость $I_k=f(R_w)$.

шается в 2 раза. Фронт волны канального тока обусловлен сдвигом импульсов тока в сопротивлении R_w , происходящем из-за эффекта „задержки“, свойственного цепочечной схеме, определяемой величиной, равной \sqrt{LC} на ячейку (фиг. 6).



Фиг. 6. Осциллограмма волны канального тока для модели.

Практически осуществить мгновенное включение всех тиратронов затруднительно. Однако определение тока в этом случае оказалось возможным выполнить аналитически. Поэтому, получив параметры

волны расчетным путем и уменьшая их на 12—15%, можно получить наиболее близкие к оригиналу величины.

Выводы

1. Получение на модели волны тока, совпадающей по своим параметрам с волной канального тока для искры, еще раз подтверждает справедливость выбранной схемы замещения канальной стадии длинной искры, предложенной И. С. Стекольниковым.

2. Цепочечная схема с последовательно изменяемыми R_l воспроизводит известные зависимости между током разряда и параметрами действительной схемы, в которой развивается длинная искра.

3. С помощью описанной модели можно измерять распределение тока главного канала в различных элементах измерительной схемы и производить замеры тока вдоль канала, что недопустимо непосредственными способами в действительных условиях.

4. Наличие схем с количественно определенными параметрами дает возможность расчетно определить форму кривой канального тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В. А. Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике. Госэнергоиздат, 1949.

2. Стекольников И. С. Отчет ЛВР ЭНИН АН СССР на тему: Моделирование тока канальной стадии длинной искры, 1953.
