

## УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК КОММУТАТОРОВ ПРИ АНАЛИЗЕ И СИНТЕЗЕ РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Петков А.А., к.т.н., с.н.с.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния"

тел./факс (057) 707-62-80, E-mail: alexp@kpi.kharkov.ua

*У роботі розглянуті питання аналізу та синтезу розрядних кіл високовольтних імпульсних випробувальних пристроїв з урахуванням нелінійності коммутатора. Наведені аналітичні співвідношення, що враховують вольт-секундну характеристику, представлену спадаючою експонентною залежністю.*

*В работе рассмотрены вопросы анализа и синтеза разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств с учетом нелинейности коммутатора. Приведены аналитические соотношения, учитывающие вольт-секундную характеристику, представленную спадающей экспоненциальной зависимостью.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** Высоковольтные импульсные испытательные устройства (ВИИУ), используемые для имитации различных импульсных воздействий, имеющих место при эксплуатации технических средств, включают в состав разрядной цепи коммутирующие элементы. Последние при определенных соотношениях параметров разрядной цепи, нагрузки и параметров импульсного воздействия, являются основным элементом, определяющим качество функционирования ВИИУ в целом. Так при разработке ВИИУ, имитирующих импульсные воздействия с временем нарастания до максимального значения порядка микросекунд и менее необходимо учитывать вольт-секундную характеристику (ВСХ) коммутатора, которая в этом случае может существенно влиять на форму генерируемого импульсного воздействия. При проектировании ВИИУ необходим также учет ВСХ технологических разрядных промежутков, которые входят в состав объектов испытания.

**Анализ публикаций.** Подробный анализ влияния характеристик коммутаторов, представимых импульсной дугой в газах при давлении выше атмосферного на параметры импульса тока, приведен в [1]. Результаты этого анализа показывают, что напряжение на межэлектродном промежутке на начальной стадии разряда емкостного накопителя энергии на RL – цепь может быть описано следующим выражением

$$u(t) = \begin{cases} U_G, & t = 0; \\ U_G \cdot e^{-Q \cdot t}, & t > 0. \end{cases} \quad (1)$$

где  $u(t)$  – напряжение на коммутаторе;  $U_G$  – зарядное напряжение ВИИУ;  $Q$  – постоянная времени спада напряжения на коммутаторе.

Постоянная времени  $Q$  зависит от вида газовой среды, ее давления и напряженности электрического поля между электродами в момент начала разряда.

Как показывает анализ литературных данных [1-4], несмотря на все многообразие типов коммутаторов, используемых в разрядных цепях ВИИУ и технологических разрядных промежутков, для целей анализа их ВСХ с той или иной степенью точности могут быть представлены в виде (1).

Так ВСХ тригатронов, работающих при атмосферном давлении, приведенные в [2], имеют  $Q = 1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ . Для разрядников под давлением

постоянная времени спада составляет  $Q = 1 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  и более [1]. Для технологических разрядных промежутков, расположенных при различных давлениях в аргоне, гелии и масле  $Q = 8 \cdot 10^4 \dots 1,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  [3, 4].

На данный момент достаточно полно рассмотрено влияние разрядных промежутков на энергетический баланс в разрядном контуре (например, [1, 3]) и процесс нарастания импульса тока (например, [1]). Однако вопросы анализа формы генерируемого импульса тока и синтез разрядных цепей ВИИУ с разрядным промежутком не нашли должного отражения в литературе.

**Целью** настоящей работы является вывод аналитических соотношений, позволяющих проводить анализ и синтез разрядных цепей ВИИУ с учетом ВСХ разрядных промежутков.

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим ВИИУ, эквивалентная электрическая схема которого в процессе разряда имеет вид одноконтурной цепи, показанной на рис. 1, в которой коммутатор представлен идеальным разрядником ( $Q = \infty$ ) и нелинейным элементом, с параметрической характеристикой вида (1).

Используя аппарат операторного исчисления [5], можно показать, что в этом случае имеют место следующие соотношения.

Если выполняется условие  $R > 2\sqrt{L/C}$ , то ток в нагрузке определяется из соотношения

$$i_H(t) = \frac{U_G \cdot Q}{L} \left[ A \cdot e^{-Q \cdot t} + B \cdot e^{-p_1 \cdot t} - D \cdot e^{-p_2 \cdot t} \right], \quad (2)$$

где  $A = \frac{1}{(-Q - p_1) \cdot (-Q - p_2)}$ ;

$$B = \frac{1}{(-Q - p_1) \cdot (p_2 - p_1)}$$

$$D = \frac{1}{(-Q - p_2) \cdot (p_2 - p_1)}$$

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{L \cdot C}}; \quad C = \frac{C_G}{1 + \frac{C_G}{C_H}}$$

$$R = R_G + R_H; L = L_G + L_H; \alpha = \frac{R}{2L};$$

$U_G$  – абсолютное значение зарядного напряжения емкостного накопителя ВИИУ.

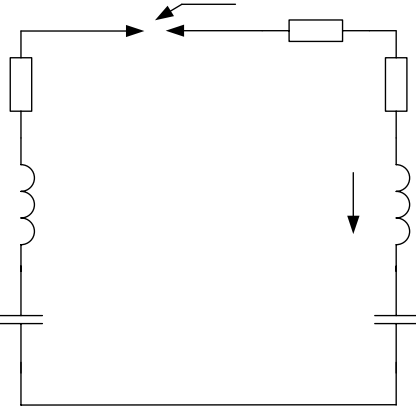


Рис. 1. Эквивалентная схема разрядной цепи ВИИУ типа ГИТ:  $U_G, C_G, L_G, R_G$  – соответственно, зарядное напряжение, емкость, индуктивность и активное сопротивление ГИТ;  $C_H, L_H, R_H$  – соответственно, емкость, индуктивность и активное сопротивление нагрузки;  $F$  – идеальный разрядник;  $u(t)$  – нелинейный элемент

Напряжение на индуктивности нагрузки  $L_H$

$$u_{L_H}(t) = U_G \cdot Q \cdot \frac{L_H}{L} \times \left[ -Q \cdot A \cdot e^{-Qt} - p_1 \cdot B \cdot e^{p_1 t} + p_2 \cdot D \cdot e^{p_2 t} \right] \quad (3)$$

Напряжение на емкости нагрузки  $C_H$

$$u_{C_H}(t) = \frac{U_G \cdot Q}{L \cdot C_H} \times \left[ (1 - e^{-Qt}) \cdot \frac{A}{Q} + (1 - e^{-p_1 t}) \cdot \frac{B}{p_1} + (e^{-p_2 t} - 1) \cdot \frac{D}{p_2} \right], \quad (4)$$

Если выполняется условие  $R = 2\sqrt{L/C}$ , то ток в нагрузке определяется из соотношения

$$i_H(t) = \frac{U_G \cdot Q}{L} \left[ A^2 \cdot e^{-Qt} + (A \cdot t - A^2) \cdot e^{-\alpha t} \right], \quad (5)$$

где  $A = 1/(Q - \alpha)$ .

Напряжение на индуктивности нагрузки  $L_H$

$$u_{L_H}(t) = U_G \cdot Q \cdot \frac{L_H}{L} \times \left\{ \left[ A - \alpha \cdot (A \cdot t - A^2) \cdot e^{-\alpha t} - A^2 \cdot Q \cdot e^{-Qt} \right] \right\}. \quad (6)$$

Напряжение на емкости нагрузки  $C_H$

$$u_{C_H}(t) = \frac{U_G \cdot Q}{L \cdot C_H} \times \left[ \frac{A^2}{Q} \cdot (1 - e^{-Qt}) + A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \left( \frac{A - t}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right) + \frac{A}{\alpha^2} - \frac{A}{\alpha} \right]. \quad (7)$$

Если выполняется условие  $R < 2\sqrt{L/C}$ , то ток в нагрузке определяется из соотношения

$$i(t) = \frac{U_G \cdot Q}{L} \left[ A \cdot e^{-\alpha t} \sin(\omega \cdot t + \chi) + B \cdot e^{-Qt} \right], \quad (8)$$

где  $A = \frac{1}{\omega \sqrt{(\alpha + Q)^2 + \omega^2}}$ ;  $B = \frac{1}{(\alpha + Q)^2 + \omega^2}$ ;

$$\chi = -\arctg \frac{\omega}{Q - \alpha}; \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \alpha^2}.$$

Напряжение на индуктивности нагрузки  $L_H$

$$u_{L_H}(t) = U_G \cdot Q \cdot \frac{L_H}{L} \cdot \left\{ A \cdot e^{-\alpha t} \times \left[ \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \chi) - \alpha \cdot \sin(\omega \cdot t + \chi) \right] - B \cdot Q \cdot e^{-Qt} \right\}. \quad (9)$$

Напряжение на емкости нагрузки  $C_H$

$$u_{C_H}(t) = \frac{U_G \cdot Q}{L \cdot C_H} \cdot \left\{ \frac{B}{Q} \cdot (1 - e^{-Qt}) + \frac{A \cdot \cos \chi}{\alpha^2 + \omega^2} \times \left[ e^{-\alpha t} \cdot [-\alpha \cdot \sin(\omega \cdot t) - \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)] + \omega \right] + \right. \quad (10)$$

$$\left. + \frac{A \cdot \sin \chi}{\alpha^2 + \omega^2} \cdot \left[ e^{-\alpha t} \cdot [-\alpha \cdot \cos(\omega \cdot t) + \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)] + \alpha \right] \right\}.$$

Таким образом, соотношения (2)-(10) описывают токи и напряжения на всех элементах нагрузки ВИИУ с учетом ВСХ разрядного промежутка. Их использование обеспечивает возможность проверки правильности принятых схмотехнических решений в процессе проектирования ВИИУ.

Однако, в процессе проектирования ВИИУ, желательно иметь априорную оценку для соотношения параметров разрядной цепи, при которых необходимо учитывать влияние ВСХ разрядных промежутков на параметры импульса тока. Для нахождения такой оценки произведем нормировку выражений для импульса тока.

Можно показать, что если выполняется условие  $r > 2$ , то выражение для тока имеет три экспоненциальных составляющих

$$I(\tau) = q \left[ \frac{e^{-q \cdot \tau}}{(-q - k_1)(-q - k_2)} + \frac{e^{k_1 \cdot \tau}}{(-q - k_1)(k_2 - k_1)} - \frac{e^{k_2 \cdot \tau}}{(-q - k_2)(k_2 - k_1)} \right], \quad (11)$$

где  $I(\tau) = \frac{i(t)}{U_G} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ;  $\tau = \frac{t}{\sqrt{L \cdot C}}$ ;  $q = Q \cdot \sqrt{L \cdot C}$ ;

$$r = \frac{R}{\sqrt{L/C}}; \quad k_{1,2} = p_{1,2} \cdot \sqrt{L \cdot C} = \left[ -\frac{r}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2}\right)^2 - 1} \right].$$

Если выполняется условие  $r < 2$ , то выражение для тока содержит затухающую гармоническую и экспоненциальную составляющие

$$I(\tau) = q \left\{ \frac{e^{-\frac{r}{2} \cdot \tau} \cdot \sin(w \cdot \tau + \alpha^*)}{w \left[ \left( q - \frac{r}{2} \right)^2 + w^2 \right]^{\frac{1}{2}}} + \frac{e^{-q \cdot \tau}}{\left( q - \frac{r}{2} \right)^2 + w^2} \right\}, \quad (12)$$

где  $w = \omega \cdot \sqrt{L \cdot C} = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{2}\right)^2}$ ,  $\alpha^* = -\arctg \left( \frac{w}{q - \frac{r}{2}} \right)$ .

Как видно из (11) и (12) нормированный импульс

тока полностью определяется двумя безразмерными параметрами  $q$  и  $r$ . Рассмотрим влияние этих параметров на время нарастания  $T_{H(0,1;0,9)}$ , определяемое как разность времен достижения на фронте импульса тока значений 0,9 и 0,1 от его максимального значения. Его безразмерный аналог, в соответствии с (10), имеет вид

$$\tau_{H(0,1;0,9)} = \frac{T_{H(0,1;0,9)}}{\sqrt{L \cdot C}}$$

тантные по (11) и (12), графики изменения отношения времени нарастания при текущем значении  $q$  ко времени нарастания при  $q = \infty$  (вариант идеального коммутатора) –  $K_1 = \frac{\tau_{H(0,1;0,9)}(q)}{\tau_{H(0,1;0,9)}(\infty)}$ . Как видно из графиков,

величины  $q$  и  $r$  существенно влияют на время нарастания импульса тока и чем больше  $r$ , тем степень влияния возрастает. Таким образом, наиболее существенное влияние нелинейность коммутатора оказывает на время нарастания при токах, описываемых тремя экспоненциальными составляющими.

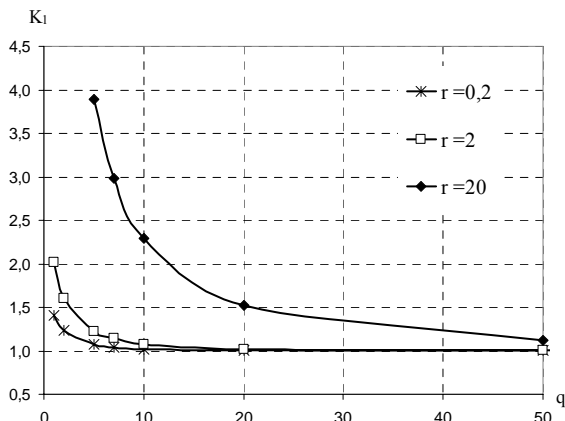


Рис. 2. Влияние ВСХ коммутатора на время нарастания импульса тока

Рассмотрим влияние параметров  $q$  и  $r$  на максимальное значение тока в импульсе  $I_{max}$ . На рис. 3 приведены графики изменения отношения максимального значения тока (нормированного в соответствии с (10)) при текущем значении  $q$  к максимальному значению тока при  $q = \infty$  –  $K_2 = \frac{I_{max}(q)}{I_{max}(\infty)}$ . Как видно из рисунка,

безразмерный параметр  $r$  гораздо слабее влияет на величину максимального значения импульса тока, чем  $q$ .

При проведении испытаний, допуск на временные параметры обычно составляет 30%, на амплитудные – 10%. (например [6]). Этим требованиям соответствуют  $K_1 = 1,3$  и  $K_2 = 0,9$ . Исходя из графиков, приведенных на рис. 2 и рис. 3, взаимосвязь параметров  $q$  и  $r$ , при которых удовлетворяются требованиям к допускам, имеет вид

$$\text{для времени нарастания при } q \geq 3,7 \cdot r^{0,76} \quad (13)$$

значение  $K_1 < 1,3$ ;

$$\text{для максимального значения тока при } q \geq 2,7 \quad (14)$$

значение  $K_2 > 0,9$ .

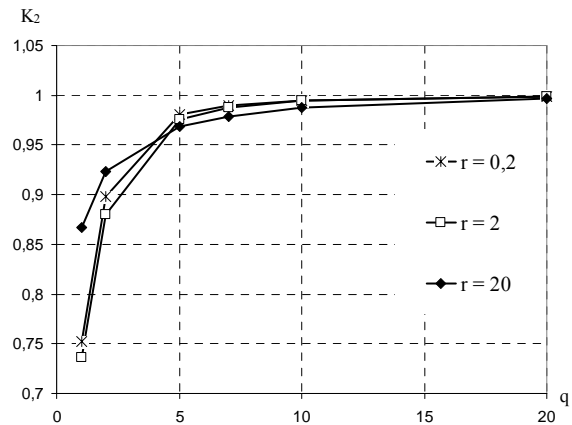


Рис. 3. Влияние ВСХ коммутатора на максимальное значение импульса тока

Таким образом, используя графики, показанные на рис. 2 и рис. 3, а также соотношения (13) и (14), можно получить априорную оценку влияния ВСХ разрядных промежутков на параметры импульса тока.

Одной из основных задач, возникающих при проектировании ВИИУ, является синтез разрядной цепи при заданных параметрах источника импульсной энергии, форме импульса тока и нагрузки. Как известно [11], данная задача не имеет однозначного решения. Рассмотрим один из вариантов синтеза разрядной цепи ВИИУ при учете ВСХ разрядного промежутка с использованием формирующего двухполюсника (ФД).

Можно показать, что в схеме, приведенной на рис. 4а могут быть сформированы импульсы тока  $m$ -го порядка, операторное изображение которых имеет вид

$$i(p) = \frac{\sum_{k=0}^{m-3} p^k \cdot A_k}{\sum_{k=0}^m p^k \cdot B_k} \quad (13)$$

где  $m \geq 3, A_k, B_k > 0$

В частности такое описание имеют импульсы тока, протекающие по электрическим цепям здания при поражении молнией молниеприемника, подключенного к заземлителю этого здания [7, 8].

Коэффициенты  $A_k, B_k$  операторного изображения тока для различных временных зависимостей могут быть вычислены по соотношениям, приведенным в [9, 10].

Используя операторный метод расчетов электрических цепей [5], можно показать, что операторное сопротивление формирующего двухполюсника имеет вид

$$Z_{FD} = \frac{\sum_{k=0}^m p^k \cdot W_{0,k}}{\sum_{k=1}^{m-1} p^k \cdot V_{1,k}} \quad (14)$$

где

$$W_{0,k} = U_G \cdot C_G \cdot Q \cdot B_k - \sum_{i=0}^{m-3} A_i \cdot \Theta_j - \sum_{i=0}^{m-3} Q \cdot A_i \cdot \Theta_j,$$

$k = 0, m,$

$\Theta_0 = 1; \Theta_1 = R \cdot C_G; \Theta_2 = L \cdot C_G.$

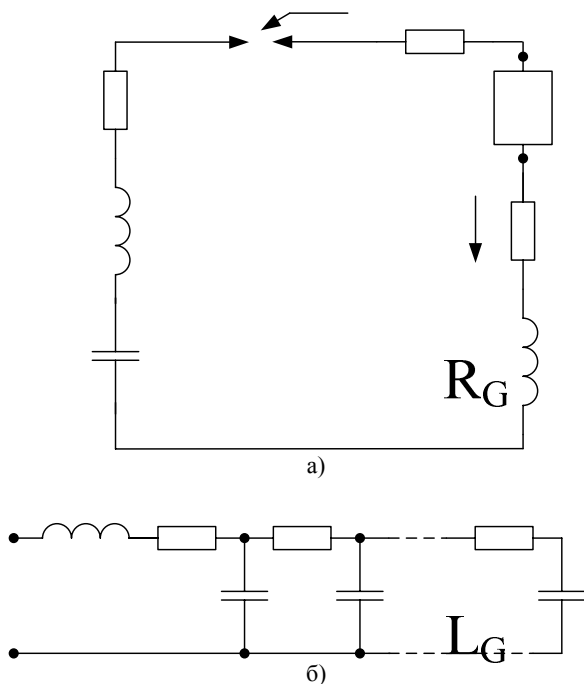


Рис. 4. Эквивалентная схема разрядной цепи ВИИУ с формирующим двухполюсником:

$U_G, C_G, L_G, R_G$  – соответственно, зарядное напряжение, емкость, индуктивность и активное сопротивление ВИИУ;  $C_H, L_H, R_H$  – соответственно, емкость, индуктивность и активное сопротивление нагрузки;  $F$  – идеальный разрядник;  $u(t)$  – нелинейный элемент;  $Z_F$  – формирующий двухполюсник;  $L_G, R_1 - R_S, C_1 - C_S$  – элементы формирующего двухполюсника

Разложение операторного сопротивления в непрерывную дробь [11] позволяет представить ФД цепочечной схемой, показанной на рис. 4б, причем количество звеньев этой схемы равно  $s = m - 1$ .

Соотношения для определения величины формирующих элементов имеют вид

$$F_{L_0} = \frac{W_{0,m}}{V_{1,m-1}}; R_j = \frac{W_{j,m-j}}{V_{j,m-j}} u(t) = \frac{V_{j,m-j}}{W_{j+1,m-j-1}}, \quad (15)$$

где  $j = \overline{1, m-1}$ .

Коэффициенты в выражениях (15) определяются по рекуррентным соотношениям

$$W_{j,k} = W_{j-1,k} - W_{j-1,m-j+1} \cdot \frac{V_{j-1,k}}{V_{j-1,m-j+1}}; \quad Z_F$$

$$j = \overline{2, m}; k = \overline{1, m-j}; W_{1,k} = W_{0,k} - W_{0,m} \cdot \frac{V_{1,k-1}}{V_{1,m-1}};$$

$$k = \overline{2, m-1}; W_{j,0} = W_{0,0}; j = \overline{1, m}; W_{1,1} = W_{0,1}; \quad b$$

$$V_{j,k} = V_{j-1,k} - V_{j-1,m-j+1} \cdot \frac{W_{j,k-1}}{W_{j,m-j}}; \quad i_H \quad R_H$$

$$j = \overline{2, m-1}; k = \overline{1, m-j};$$

$$V_{1,1} = Q \cdot C_G \cdot A_0; V_{1,m-1} = C_G \cdot A_{m-3};$$

$$V_{1,k} = C_G \cdot (Q \cdot A_{k-1} + A_{k-2}); k = \overline{2, m-2}, m \geq 4.$$

Значения коэффициентов операторного сопротивления при формировании токов 3 – 7 порядков приведены в табл. 1 – 3.

Таблица 1

$m$	$W_{0,0}^m$	$W_{0,1}^m$	$W_{0,2}^m$	$W_{0,3}^m$
3	$U_G \cdot C_G \cdot Q \cdot B_0 - A_0 \cdot Q \cdot \Theta_0$ <b>a</b> $L_0$	$U_G \cdot C_G \cdot Q \cdot B_1 - A_0 \cdot \Theta_0 - A_0 \cdot Q \cdot \Theta_1$	$U_G \cdot C_G \cdot Q \cdot B_2 - A_0 \cdot \Theta_1 - A_0 \cdot Q \cdot \Theta_2$	$U_G \cdot C_G \cdot Q \cdot B_3 - A_0 \cdot \Theta_2$
4		$W_{0,1}^3 - R_1 \cdot Q \cdot \Theta_0$ <b>R_1</b>	$W_{0,2}^3 - A_1 \cdot \Theta_0 - A_1 \cdot Q \cdot \Theta_1$	$W_{0,3}^3 - A_1 \cdot \Theta_1 - A_1 \cdot Q \cdot \Theta_2$
5			$W_{0,2}^4 - A_2 \cdot Q \cdot \Theta_0$ <b>R_2</b>	$W_{0,3}^4 - A_2 \cdot \Theta_0 - A_2 \cdot Q \cdot \Theta_1$ <b>R_3</b>
6			$W_{0,3}^5 - A_3 \cdot Q \cdot \Theta_0$	
7				$W_{0,3}^5 - A_3 \cdot Q \cdot \Theta_0$

Таблица 2

$m$	$W_{0,4}^m$	$W_{0,5}^m$	$W_{0,6}^m$	$W_{0,7}^m$
3	-	-	$C_1$ - $C_2$	-
4	$U_G \cdot C_G \cdot Q \cdot B_4 - A_1 \cdot \Theta_2$	-	-	-
5	$W_{0,4}^4 - A_2 \cdot \Theta_1 - A_2 \cdot Q \cdot \Theta_2$ <b>b</b>	$U_G \cdot C_G \cdot Q \cdot B_5 - A_2 \cdot \Theta_2$	-	-
6	$W_{0,4}^5 - A_3 \cdot \Theta_0 - A_3 \cdot Q \cdot \Theta_1$	$W_{0,5}^4 - A_3 \cdot \Theta_1 - A_3 \cdot Q \cdot \Theta_2$	$U_G \cdot C_G \cdot Q \cdot B_6 - A_3 \cdot \Theta_2$	-
7	$W_{0,4}^6 - A_4 \cdot Q \cdot \Theta_0$	$W_{0,5}^5 - A_4 \cdot \Theta_0 - A_4 \cdot Q \cdot \Theta_1$	$W_{0,6}^6 - A_4 \cdot \Theta_1 - A_4 \cdot Q \cdot \Theta_2$	$U_G \cdot C_G \cdot Q \cdot B_7 - A_4 \cdot \Theta_2$

Таблица 3

$m$	$V_{1,1}^m$	$V_{1,2}^m$	$V_{1,3}^m$	$V_{1,4}^m$	$V_{1,5}^m$	$V_{1,6}^m$
3	$Q \cdot C_G \cdot A_0$	$C_G \cdot A_0$	-	-	-	-
4		$C_G \cdot (Q \cdot A_1 + A_0)$	$C_G \cdot A_1$	-	-	-
5			$C_G \cdot (Q \cdot A_2 + A_1)$	$C_G \cdot A_2$	-	-
6				$C_G \cdot (Q \cdot A_3 + A_2)$	$C_G \cdot A_3$	-
7		$C_G \cdot (Q \cdot A_4 + A_3)$	$C_G \cdot A_4$			

Для формирования импульса тока 3-го порядка вида

$$i(t) = \sum_{j=1}^3 a_j \cdot \exp(-b_j \cdot t) \quad (16)$$

можно указать условия, при которых импульс тока может быть сформирован в схеме, приведенной на рис. 2а, по крайней мере, путем увеличения зарядного напряжения

$$\begin{cases} B_2 - Q \cdot B_3 > 0; \\ B_1 - Q \cdot B_2 + Q^2 \cdot B_3 > 0 \\ Q \cdot B_1 - Q^2 \cdot B_2 + Q^3 \cdot B_3 - B_0 > 0 \end{cases} \quad (17)$$

где  $B_0, B_1, B_2, B_3$ , – коэффициенты операторного изображения тока;  $Q$  – постоянная времени спада напряжения на коммутаторе.

В качестве иллюстрации применения описанной методики произведем синтез разрядной цепи для формирования импульса тока, протекающего по электрическим цепям здания при поражении молнией молниеприемника, подключенного к заземлителю этого здания [7, 8] с помощью генератора ГИТ-100, эксплуатируемого на экспериментальной базе НИПКИ "Молния" [12].

*Постановка задачи.* Для генератора ГИТ-100, выполненного на базе ЕНЭ и имеющего собственные параметры  $R_G = 2,68 \text{ Ом}$ ,  $L_G = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$ ,  $C_G = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$ ,  $U_G(0) = 1 \cdot 10^5 \text{ В}$ , требуется выбрать параметры ФД таким образом, чтобы в нагрузке с параметрами  $R_H = 1 \text{ Ом}$  и  $L_H = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$  протекал импульс тока, описываемый выражением (16) с следующими значениями коэффициентов  $a_1 = 6,5 \cdot 10^3 \text{ А}$ ,  $a_2 = 6,5 \cdot 10^3 \text{ А}$ ,  $a_3 = -1,3 \cdot 10^4 \text{ А}$ ,  $b_1 = 2,6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ,  $b_2 = 7,7 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ ,  $b_3 = 3,98 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ . Для коммутации используется разрядник, имеющий постоянную времени спада напряжения  $Q = 3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ .

Проверка условий (17) показывает возможность формирования импульса тока с заданными параметрами при заданной ВСХ коммутатора. Расчеты, проведенные с использованием исходных данных и соотношений (15), дают следующие значения параметров ФД  $L_0 = 5,68 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ;  $R_1 = 11,2 \text{ Ом}$ ;  $C_1 = 8,78 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$ ;  $R_2 = 6,16 \text{ Ом}$ ;  $C_2 = 1,41 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ .

Компьютерное моделирование переходного процесса в цепи с рассчитанными параметрами показало удовлетворительное совпадение рассчитанных значений амплитудно-временных параметров импульса тока с заданными.

## ВЫВОДЫ

1. Выведены аналитические выражения для расчета тока и напряжений на элементах нагрузки ВИИУ, которые учитывают ВСХ разрядного промежутка.

2. Получены соотношения между параметрами разрядной цепи ВИИУ, обеспечивающие априорную оценку влияния разрядного промежутка на форму импульса тока.

3. Приведены аналитические соотношения для выбора параметров разрядной цепи с учетом ВСХ коммутатора.

Примененный в работе подход может быть использован для синтеза разрядных цепей ВИИУ, содержащих нелинейные элементы с иными видами характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Романенко И.Н. Импульсные дуги в газах. – Чебоксары: Чувашское книжное изд-во, 1976. – 136 с.
- [2] Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц, В.С. Комельков и др.; Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
- [3] Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород / А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Е.К. Завадовская и др. – Томск: Изд. ТГУ, 1971. – 227 с.
- [4] Шахтагинский Т.И. Некоторые особенности электрического разряда в промежутке с диэлектриком между электродами в инертных газах // Техника высоких напряжений. Труды Московского ордена Ленина энергетического института. Выпуск LXX. – М.: МЭИ, 1968. – С. 161 – 171.
- [5] Конторович М.И. Операторное исчисление и процессы в электрических цепях. – М.: Сов. радио, 1975. – 320 с.
- [6] ГОСТ Р 50932-96 Устойчивость оборудования проводной связи к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1996. – 15 с.
- [7] Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman, Mark I. Fernandez, Carlos T. Mata, Keith J. Rambo, Michael V. Stapleton, Rafael R. Sutil. Direct Lightning Strikes to the Lightning Protective System of a Residential Building: Triggered-Lightning Experiments // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2002. - Vol. 17, №. 2. - P. 575 – 586.
- [8] Петков А.А., Колиушко Д.Г. Формирование импульсов тока, сопровождающих грозовую деятельность // Технічна електродинаміка. - 2006. - Ч.4., тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – С. 21 – 24.
- [9] Петков А.А. Формирование испытательных импульсов тока сложной формы // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ "ХПИ". - №4. – 2004. – С.22 – 30.
- [10] Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку // Электротехника. – 1990. - №10. – С. 35 – 36.
- [11] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с.
- [12] Баранов М.И., Колиушко Г.М., Колобовский А.К., Кравченко В.И. Комплекс высоковольтного испытательного оборудования экспериментальной базы НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". - №4. – 2004. – С. 3 – 13.

Поступила 05.09.2007