

А.А. ПЕТКОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

### ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ЗАДАНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

У роботі наведено емпіричні співвідношення, які дозволяють робити вибір величини параметрів розрядного кола високовольтних імпульсних випробувальних пристроїв при різних способах задання часових характеристик формованого імпульсу.

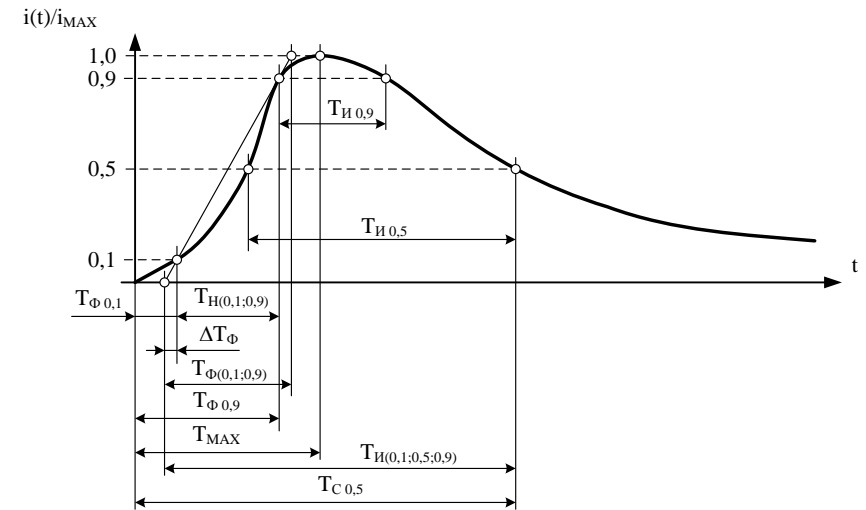
The empirical relationship allowing to make of a choice value of the discharge circuit high-voltage pulse test devices parameters by different techniques of tasks of the formed pulse time characteristic is offered.

**Постановка проблеми.** Процес проектування високовольтних імпульсних испытательних устройств (ВИИУ) включає в себе в качестве основной задачи выбор параметров элементов входящих в состав их разрядных цепей. Исходными данными для выбора являются, прежде всего, требования к форме генерируемого испытательного импульса. В силу различного назначения объектов, которые испытываются с помощью ВИИУ, применяются различные способы задания формы испытательного импульса, что влечет за собой необходимость разработки соответствующих методов выбора параметров элементов, входящих в разрядную цепь.

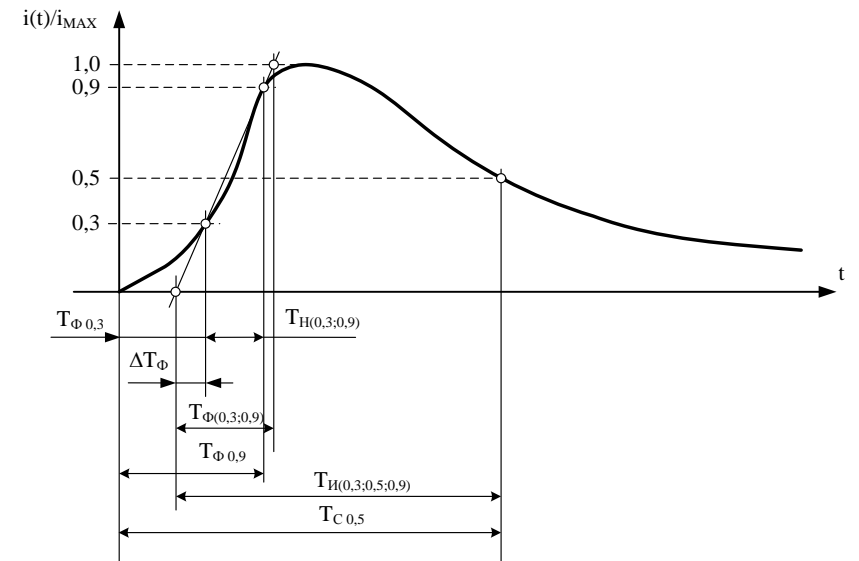
**Анализ публикаций.** Применяемые на практике различные способы определения временных параметров импульсных воздействий (импульсы тока, напряжения, электрического и магнитного поля) достаточно полно представлены в [1 - 4]. Наиболее часто при испытаниях контролируются следующие наборы временных параметров импульсных воздействий, определение которых показано на рис. 1 на примере импульса тока:  $\{T_{\Phi(0,1;0,9)}, T_{И(0,1;0,5;0,9)}\}$ ,  $\{T_{\Phi(0,3;0,9)}, T_{И(0,3;0,5;0,9)}\}$ ,  $\{T_{\max}, T_{C 0,5}\}$ ,  $\{T_{\max}, T_{И 0,5}\}$ ,  $\{T_{И(0,1;0,9)}, T_{И 0,5}\}$ ,  $\{T_{\max}, T_{И 0,9}\}$ ,  $\{T_{И(0,1;0,9)}, T_{C 0,5}\}$ ,  $\{T_{И(0,3;0,9)}, T_{C 0,5}\}$ .

Общая методика выбора параметров разрядной цепи ВИИУ, представимой последовательной RLC - цепью при задании аperiodического импульса контролируемыми параметрами, рассмотрена автором в [5]. Там же приведены эмпирические соотношения, позволяющие определять величины элементов разрядной цепи при задании импульса тока набором вида  $\{T_{\Phi(0,1;0,9)}, T_{И(0,1;0,5;0,9)}\}$ .

**Целью** настоящей работы является построение математических соотношений, обеспечивающих выбор параметров элементов разрядной цепи ВИИУ при наиболее часто используемых наборах контролируемых параметров.



а)



б)

Рис. 1. Варианты определения контролируемых параметров импульса тока

**Материалы и результаты исследований.** Для наиболее распространенных конструкций ВИИУ схема разрядной цепи с той или иной степенью приближения может быть представлена последовательной RLC – цепью. Ве-

личины параметров ее элементов будем определять из соотношений, аналогичных, приведенным в [5]. Для использования соотношений наряду с амплитудно-временными параметрами импульса тока должна быть задана величина хотя бы одного элемента из ряда  $R, L, C$ . Тогда,

- если задано активное сопротивление  $R$

$$L = \frac{R}{r} \cdot \frac{t_{i\Delta d}}{\tau_{i\Delta d}}; \quad C = \frac{r}{R} \cdot \frac{t_{i\Delta d}}{\tau_{i\Delta d}}; \quad U(0) = \frac{i_{max}}{I_{max}} \cdot \frac{R}{r}; \quad (1)$$

- если задана индуктивность  $L$

$$R = r \cdot L \cdot \frac{\tau_{i\Delta d}}{t_{i\Delta d}}; \quad C = \frac{1}{L} \cdot \left( \frac{t_{i\Delta d}}{\tau_{i\Delta d}} \right)^2; \quad U(0) = L \cdot \frac{i_{max}}{I_{max}} \cdot \frac{\tau_{i\Delta d}}{t_{i\Delta d}}; \quad (2)$$

- если задана емкость  $C$

$$R = \frac{r}{C} \cdot \frac{t_{i\Delta d}}{\tau_{i\Delta d}}; \quad L = \frac{1}{C} \cdot \left( \frac{t_{i\Delta d}}{\tau_{i\Delta d}} \right)^2; \quad U(0) = \frac{1}{C} \cdot \frac{i_{max}}{I_{max}} \cdot \frac{t_{i\Delta d}}{\tau_{i\Delta d}}, \quad (3)$$

где  $t_{нар}$  – контролируемый параметр, характеризующий нарастание импульса тока ( $T_{max}, T_{H(0,1;0,9)}, T_{Ф(0,1;0,9)}, T_{Ф(0,3;0,9)}$ );

$i_{max}$  – максимальное значение тока в импульсе;

$U(0)$  – зарядное напряжение на емкости (абсолютное значение) в эквивалентной схеме ВИИУ;

$\tau_{нар}$  – безразмерный аналог величины  $t_{нар}$ , ( $\tau_{max}, \tau_{H(0,1;0,9)}, \tau_{Ф(0,1;0,9)}, \tau_{Ф(0,3;0,9)}$ );

$r, I_{max}$  – безразмерные аналоги соответственно величин  $R$  и  $i_{max}$ .

Нормировка безразмерных параметров производилась с использованием следующих соотношений:

$$r = \frac{R}{\sqrt{L/C}}, \quad I = \frac{i}{U(0)} \sqrt{L/C}, \quad \tau = \frac{t}{\sqrt{LC}}. \quad (4)$$

Для определение величины безразмерных параметров  $r, I_{max}, \tau_{нар}$  была получена формула:

$$F = A(t_{cn} / t_{нар})^B, \quad (5)$$

где  $F$  – один из безразмерных параметров;

$t_{cn}$  – контролируемый параметр, характеризующий спад импульса тока ( $T_{и(0,1;0,5;0,9)}, T_{и(0,3;0,5;0,9)}, T_{C0,5}, T_{и0,5}, T_{и0,9}$ );

$A, B$  – коэффициенты, выбираемые по табл. 1 – 3, в зависимости от используемого набора контролируемых параметров.

Если одновременно задано несколько параметров из ряда  $R, L, C$ , то вычисления проводятся по соответствующим соотношениям из (1) – (3), после чего выбирается вариант с большим  $U(0)$ .

Таблица 1

F = A (T <sub>C0,5</sub> / T <sub>max</sub> ) <sup>B</sup>					
Функция, F	T <sub>C0,5</sub> / T <sub>max</sub>		A	B	максимальная погрешность, %
	от	до			
r	2,7	3,1	0,44	1,54	1
	3,1	4,2	0,7	1,134	
	4,2	6	0,97	0,905	
	6	12	1,285	0,749	
	12	40	1,645	0,651	
	40	97,8	1,94	0,606	
	2,7	6	0,7	1,1	5
	6	97,8	1,56	0,66	
I <sub>max</sub>	2,7	3,1	1,09	-1,1	1
	3,1	5,5	0,772	-0,806	
	5,5	18	0,61	-0,668	
	18	97,8	0,51	-0,605	
	2,7	18	0,726	-0,74	5
τ <sub>max</sub>	2,7	5,6	1,56	-0,46	1
	5,6	97,8	1,44	-0,407	
	2,7	97,8	1,49	-0,42	5

Коэффициенты, приведенные в табл. 1 – 3 определены путем расчета безразмерных величин и аппроксимации полученных результатов аналогично с [5].

Приведем дополнительно ряд эмпирических соотношений, которые позволяют использовать данные табл. 1 – 3 настоящей статьи и табл. 1 из [5] для выбора величины элементов разрядной цепи при других видах наборов контролируемых параметров, не предусмотренных условиями, приведенными в таблицах.

Для набора {T<sub>max</sub>, T<sub>и0,5</sub>} можно использовать данные табл. 1 применив следующее соотношение

$$\frac{\dot{O}_{C0,5}}{\dot{O}_{max}} = \hat{E} \frac{\dot{O}_{\dot{E}0,5}}{\dot{O}_{max}}, \quad (6)$$

где  $K = \begin{cases} \frac{1}{1-0,234 \cdot r^{-1,36}}, & \text{а́ннèè } 2 \leq r \leq 10; \\ 1, & \text{а́ннèè } r > 10; \end{cases}$  с погрешностью не более 5%.

Порядок применения выражения (6) следующий:

а) используя данные искомого набора вычисляем отношение  $T_{C0,5} / T_{max}$  при  $K = 1$ ;

б) с помощью табл. 1 вычисляем величину  $r$ ;

в) если  $r > 10$ , то определяем  $I_{max}$ ,  $\tau_{max}$  по (5).

г) если  $2 \leq r \leq 10$ , то вычисляем  $K = \frac{1}{1-0,234 \cdot r^{-1,36}}$ , производим пересчет отношения по (6) и далее определяем  $r$ ,  $I_{max}$ ,  $\tau_{max}$  по (5).

Таблица 2

F = A (T <sub>И(0,3;0,5;0,9)</sub> / T <sub>Ф(0,3;0,9)</sub> ) <sup>B</sup>					
Функция, F	T <sub>И(0,9;0,5;0,3)</sub> / T <sub>Ф(0,9;0,3)</sub>		А	В	максимальная погрешность, %
	от	до			
r	2,11	3,1	1	0,935	1
	3,1	5,9	1,27	0,722	
	5,9	18	1,57	0,604	
	18	122	1,886	0,539	
	122	186,7	2,08	0,516	
	2,11	9	1,2	0,74	5
9	186,7	1,79	0,55		
I <sub>max</sub>	2,11	4	0,588	-0,637	1
	4	30	0,515	-0,543	
	30	186,7	0,47	-0,513	
	2,11	186,7	0,53	-0,54	5
τ <sub>Ф(0,3;0,9)</sub>	2,11	35	1,343	-0,457	1
	35	186,7	1,49	-0,488	
	2,11	186,7	1,37	-0,47	5

Аналогично для набора {T<sub>И(0,3;0,9)</sub>, T<sub>С0,5</sub>} можно использовать данные табл. 2 применив следующее соотношение

$$\frac{\dot{O}_{\dot{E}(0,3;0,5;0,9)}}{\dot{O}_{\dot{O}(0,3;0,9)}} = \hat{E} \frac{\dot{O}_{\dot{N}0,5}}{\dot{O}_{\dot{I}(0,3;0,9)}}, \quad (7)$$

где  $K = \begin{cases} 0,6 - 0,548 \cdot r^{-1,55}, & \text{а́ннèè } 2 \leq r \leq 20; \\ 0,6, & \text{а́ннèè } r > 20; \end{cases}$  с погрешностью не более 5%.

Таблица 3

F = A (T <sub>И0,9</sub> / T <sub>max</sub> ) <sup>B</sup>						
Функция, F	T <sub>И0,9</sub> / T <sub>max</sub>		А	В	максимальная погрешность, %	
	от	до				
r	0,93	1,08	2,42	2,3	1	
	1,08	1,34	2,515	1,766		
	1,34	1,76	2,87	1,31		
	1,76	2	3,1	1,15		
	2	2,6	3,44	0,99		
	2,6	4,6	4,06	0,811		
	4,6	12	4,976	0,674		
	12	15,5	5,62	0,62		
	0,93	1,5	2,4	1,8	5	
	1,5	5	3,51	0,915		
I <sub>max</sub>	5	15,5	5,1	0,66	1	
	0,93	1,25	0,323	-1,55		
	1,25	1,5	0,304	-1,24		
	1,5	2,3	0,273	-0,994		
	2,3	3,7	0,237	-0,814		
	3,7	9,6	0,201	-0,683		
	9,6	15,5	0,175	-0,62		
	0,93	2	0,317	-1,26		5
	2	15,5	0,222	-0,722		
	τ <sub>max</sub>	0,93	1,48	0,934		-0,76
1,48		3	0,859	-0,56		
3		15,5	0,769	-0,455		
0,93		4,5	0,91	-0,6		
4,5		15,5	0,75	-0,45	5	

Для набора {T<sub>И(0,1;0,9)</sub>, T<sub>С0,5</sub>} можно использовать данные табл. 1 из [5] применив следующее соотношение

$$\frac{\dot{E}_{(0,1;0,5;0,9)}}{\dot{O}_{(0,1;0,9)}} = \hat{E} \frac{\dot{N}_{0,5}}{\dot{O}_i(0,1;0,9)}, \quad (8)$$

где  $K = \begin{cases} 0,814 - 0,00224 \cdot r, & \text{àñëë } 2 \leq r \leq 3; \\ 0,8, & \text{àñëë } r > 3; \end{cases}$  с погрешностью не более 5%.

Для набора  $\{T_{H(0,1;0,9)}, T_{I0,5}\}$  можно использовать данные табл. 1 из [5] применив следующее соотношение

$$\frac{\dot{E}_{(0,1;0,5;0,9)}}{\dot{O}_{(0,1;0,9)}} = \hat{E} \frac{\dot{E}_{0,5}}{\dot{O}_i(0,1;0,9)}, \quad (9)$$

где  $K = \begin{cases} 0,8 + 0,373 \cdot r^{-1,56}, & \text{àñëë } 2 \leq r \leq 10; \\ 0,8, & \text{àñëë } r > 10; \end{cases}$  с погрешностью не более 5%.

В качестве иллюстрации рассмотренной методики произведем выбор параметров ВИИУ, разрядная цепь которого представима последовательным RLC – контуром.

На активной нагрузке  $R = 1$  кОм требуется сформировать апериодический коммутационный импульс напряжения с максимальным значением  $U = 10$  кВ и временными параметрами  $T_{max} = 250$  мкс,  $T_{C0,5} = 2500$  мкс [2].

Определим максимальное значение импульса тока, протекающего в активной нагрузке  $i_{max} = U / R = 10$  А. Исходя из заданных временных параметров, для отношения  $T_{C0,5} / T_{max} = 10$  по табл. 1 определяем коэффициенты А и В (для погрешности 1%) и рассчитываем безразмерные величины:

$$r = 1,285 \cdot 10^{0,749} = 7,209; \quad I_{max} = 0,61 \cdot 10^{-0,668} = 0,131; \quad \tau_{max} = 1,44 \cdot 10^{-0,407} = 0,564.$$

Далее по соотношениям (1) вычисляем параметры элементов разрядной цепи и зарядное напряжение:

$$L = 6,16 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}; \quad C = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}; \quad U(0) = 1,06 \cdot 10^4 \text{ В}.$$

Моделирование, проведенное с помощью программного продукта Micro-Cap 7, показало, что амплитудно-временные характеристики импульса напряжения, формируемого на активной нагрузке в цепи с рассчитанными выше параметрами элементов, отличаются от заданных значений не более чем на 3%.

## Выводы.

1. В работе получены эмпирические соотношения, позволяющие производить выбор величины параметров элементов разрядной цепи ВИИУ при различных способах задания временных характеристик формируемого импульса.

2. Материалы работы могут быть использованы для разработки методики выбора параметров элементов разрядных цепей ВИИУ при генерировании других форм импульсных воздействий (например, прямоугольной и колебательной формы).

**Список литературы:** 1. *Кравченко В.И.* Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с. 2. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической изоляции. Межгосударственный стандарт. Минск: Издательство стандартов, 1998. – 31 с. 3. ГОСТ 16357-83. Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 40 с. 4. ГОСТ Р 50932-96. Устойчивость оборудования проводной связи к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний. М.: Госстандарт России, 1994. – 15 с. 5. *Петков А.А.* Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехника та електроенергетика. – 2005. – №1. – С. 65 – 69.

*Поступила в редколлегию 06.03.06.*