

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОПИСАНИЯ СТРУКТУР РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Петков А.А., к.т.н.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния"  
Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61013, Харьков-13, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния"  
тел./факс (057) 707-62-80, e-mail: alexp@kpi.kharkov.ua

*У роботі запропоновані методики формалізації опису високовольтних імпульсних випробувальних пристроїв, які забезпечують структурний синтез їхніх розрядних кіл. Розглянуто формальний опис різних типів випробувальних пристроїв.*

*В работе предложены методики формализации описания высоковольтных импульсных испытательных устройств, обеспечивающие структурный синтез их разрядных цепей. Рассмотрено формальное описание различных типов испытательных устройств.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** В настоящее время значительное внимание уделяется испытаниям электротехнического и электронного оборудования на стойкость к воздействию мощных электромагнитных факторов естественного происхождения (в основном факторы, сопровождающие грозовую деятельность) и электромагнитных факторов, возникающих в связи с технологической деятельностью человека (в частности, эксплуатация электроэнергетических систем и контактной сети железных дорог). Испытания такого рода проводятся с помощью высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ), создаваемых на базе емкостных накопителей энергии. Многообразие существующих испытательных импульсов, постоянное расширение объема знаний о процессах порождающих мощные электромагнитные факторы и развитие нормативной базы, регламентирующей испытания, ставят задачу синтеза разрядных цепей ВИИУ, как одну из основных задач их проектирования.

**Анализ публикаций.** Процесс проектирования сложных электротехнических устройств включает проектную процедуру синтеза [1], и, в частности, проектные решения ВИИУ обеспечиваются проведением параметрического и структурного синтеза эквивалентных электрических схем их разрядных цепей.

Под параметрическим синтезом эквивалентной электрической схемы разрядных цепей ВИИУ будем понимать вычислительную процедуру, конечным результатом которой является набор числовых значений параметров элементов электрической схемы разрядной цепи, обеспечивающих формирование в заданной нагрузке импульсного воздействия с требуемыми амплитудно-временными характеристиками. Вопросы параметрического синтеза при различных способах описания формы импульсных воздействий рассмотрены в работах [2 - 4].

Под структурным синтезом эквивалентной электрической схемы разрядных цепей ВИИУ будем понимать процедуру, конечным результатом которой является состав элементов электрической схемы разрядной цепи и способ их соединения между собой,

реализация которых позволяет формировать импульсные воздействия требуемой формы. Структурный синтез в целом является трудно формализуемым процессом [1], и, несмотря на имеющиеся публикации по анализу множества структур цепей в целом [5, 6], вопрос структурного синтеза разрядной цепи ВИИУ до настоящего времени решается путем экспертной оценки, проводимой специалистами в области разработки высоковольтной импульсной техники или методом аналогов.

**Целью** настоящей работы является разработка методики формализованного описания структуры разрядных цепей и формы импульсных воздействий, обеспечивающей автоматизацию структурного синтеза эквивалентной электрической схемы разрядной цепи ВИИУ.

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обобщенно процесс структурного синтеза эквивалентной электрической схемы может быть представлен в виде процедуры сопоставления функциональных требований, предъявляемых к ВИИУ (в первую очередь, требования к форме импульсного воздействия), со структурными решениями разрядной цепи [1].

$$F \Rightarrow A, \quad (1)$$

где  $F$  – множество описаний формы импульсных воздействий;  $A$  – множество структурных решений эквивалентной электрической схемы ВИИУ.

Если имеется библиотека схемных решений, характеризующаяся тем, что имеется однозначная связь между каждым набором из  $A$  и  $F$  (т.е. известна форма импульса генерируемого ВИИУ с данным схемным решением), то процесс структурного синтеза сводится к проведению информационно-поисковой процедуры, достаточно просто реализуемой с помощью современных компьютеров. Основным требованием при этом является формализация описания множеств  $A$  и  $F$  для доступности компьютерной обработки информации. Ниже предлагается методика формализации описания этих множеств.

Все многообразие форм импульсных воздействий, предназначенных для испытания оборудования,

может быть описано двумя основными способами [7]: аналитически и с помощью контролируемых параметров. Наиболее универсальным описанием, обеспечивающим наряду с физическими испытаниями, возможность математического моделирования воздействия импульса на испытуемый объект, является аналитическое представление формы испытательных импульсов:  $v(t) = f(t, x^*)$ , где  $v(t)$  - значение импульса в момент  $t$ ,  $x^*$  - набор коэффициентов, характеризующих форму импульса, причем  $v(0) = 0$  и  $v(\infty) = 0$ . В силу однозначности операторного преобразования Лапласа можно утверждать, что каждому структурному решению разрядной цепи ВИИУ соответствует одно и только одно операторное изображение формируемого импульсного воздействия, которое в общем случае представимо рациональной дробью вида

$$v(p) = \frac{\sum_{i=0}^m a_i \cdot p^i}{\sum_{i=0}^n b_i \cdot p^i}, \quad (2)$$

где  $m < n$ .

Причем, в зависимости от формы описания импульсного воздействия во временной области (вид функций, математические отношения между ними и значениями коэффициентов  $x^*$ ) в соответствующем операторном выражении вида (2) отдельные коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  могут отсутствовать [8]. Это позволяет для импульсных воздействий, генерируемых ВИИУ, в качестве формального описания их формы использовать факт наличия или равенства нулю коэффициентов полиномов в (2). Такое описание представляет собой символьную строку и может свободно идентифицироваться с помощью функций обработки символьных конструкций, входящих в состав программного обеспечения современных компьютеров, например

$$\text{СОИВ} = 2+0/3+2+1, \quad (3)$$

где СОИВ – строка-описание импульсного воздействия;  $2+0$  – набор символов, описывающий числитель в (2);  $/$  – символ, разделяющий описание числителя и знаменателя;  $3+2+1$  – набор символов, описывающий знаменатель в (2).

Каждая цифра в описании указывает на присутствие в (2) коэффициента при  $p$  в степени равной значению цифры. Т.е. выражение (3) формализует следующее операторное изображение импульсного воздействия

$$v(p) = \frac{a_2 \cdot p^2 + a_0}{b_3 \cdot p^3 + b_2 \cdot p^2 + b_1 \cdot p}, \quad (4)$$

Таким образом, символьная строка вида (3) однозначно описывает форму импульсного воздействия генерируемого в разрядной цепи ВИИУ и может выполнять функцию формального описания элементов множества  $F$ , доступного компьютерной обработке.

Для формализации описания множества  $A$  введем ряд определений и обозначений.

*Двухполюсник* – часть электрической цепи с двумя выделенными зажимами, именуемыми полюсами [9]. Обозначение двухполюсника - (ДП), где ДП – набор символов, характеризующих структуру двухполюсника.

*Элемент* – элементарный двухполюсник, характеризующийся некоторым законом изменения напряжения на его выводах при протекании через него импульса тока  $u(t)$ . В настоящей работе используются следующие типы элементов:  $R$  – линейный резистивный элемент,  $L$  – линейный индуктивный элемент,  $C$  – линейный емкостной элемент.

*Ветвь* – двухполюсник, состоящий из последовательно соединенных элементов. Факт последовательного соединения элементов обозначим символом "\*", например,  $(R*L)$ .

*Порядок ветви* – количество типов элементов в ветви.

*Нагрузка ВИИУ* – двухполюсник, для которого задается в явном виде напряжение на его выводах и / или ток, протекающий через двухполюсник. Обозначение нагрузки - (Н), где Н – набор символов, характеризующих структуру нагрузки. При описании структуры символом "||" обозначается параллельное соединение, например,  $(Н) = (R_H * L_H)$  – нагрузка состоит из последовательно соединенных линейных резистивного и индуктивного элементов;  $(Н) = (R_H) || (C_H)$  – нагрузка состоит из параллельно соединенных линейных резистивного и емкостного элементов.

*Источник энергии ВИИУ* – ветвь, содержащая как минимум линейный емкостной элемент, на котором в начальный рассматриваемый момент накоплен некоторый электрический заряд, например,  $(C_G)$ ,  $(L_G * C_G)$ ,  $(R_G * C_G)$ ,  $(R_G * L_G * C_G)$ .

*Разрядная цепь ВИИУ* – параллельное соединение нагрузки и двухполюсника, содержащего источник энергии. Например, описание разрядной цепи ВИИУ с резистивной нагрузкой и одним источником энергии имеет вид

$$\text{СОС} = (R_G * L_G * C_G) || (R_H), \quad (5)$$

где СОС – строка-описание структуры разрядной цепи.

Таким образом, элемент множества  $A$  может быть формально описан символьной строкой вида (5), доступной для компьютерной обработки.

Одним из наиболее распространенных типов ВИИУ является генератор импульсов тока (ГИТ) – высоковольтное устройство, эквивалентная электрическая схема которого в процессе разряда представляет собой параллельное соединение RLC – ветви и нагрузки (рис. 1). Таким образом, общее описание структуры разрядной цепи ГИТ представимо в виде

$$\text{СОС}_{\text{ГИТ}} = (R_G * L_G * C_G) || (Н). \quad (6)$$

Чаще всего нагрузкой ГИТ являются резистивные и индуктивные элементы (или ветвь, представляющая их последовательное соединение), однако, в специальных схемах формирования в качестве нагрузки применяются и емкостные элементы.

Выражения для операторных изображений импульсов тока и напряжения на нагрузке формируемых с помощью ГИТ общеизвестны и приведены в различных источниках, например [10].

Для варианта, когда разрядник  $F$  представляет собой идеальный ключ, формальное описание структуры нагрузки и генерируемых импульсных воздействий приведено в табл. 1.

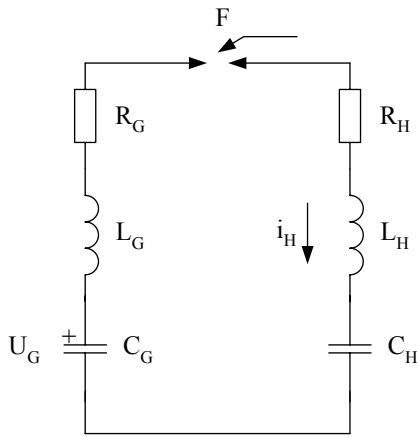


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема разрядной цепи ВИИУ типа ГИТ:

$U_G, C_G, L_G, R_G$  – соответственно, зарядное напряжение, емкость, индуктивность и активное сопротивление ГИТ;  
 $C_H, L_H, R_H$  – соответственно, емкость, индуктивность и активное сопротивление нагрузки;  $F$  – разрядник

Вторым наиболее распространенным типом ВИИУ является генератор импульсов напряжения (ГИН) – высоковольтное устройство, эквивалентная электрическая схема которого в процессе разряда представляет собой параллельное соединение RLC – ветви, разрядного сопротивления и нагрузки (см. рис. 2). Таким образом, общее описание структуры разрядной цепи ГИН представимо в виде

$$\text{СОС}_{\text{ГИН}} = (R_G * L_G * C_G) || (R_P) || (H). \quad (7)$$

Таблица 1

Описание структуры нагрузки	Описание импульсного воздействия	
	ток в нагрузке	напряжение на нагрузке
( $R_H$ )	0/2+1+0	0/2+1+0
( $L_H$ )	0/2+1+0	1/2+1+0
( $C_H$ )	0/2+1+0	0/3+2+1
( $R_H * L_H$ )	0/2+1+0	1+0/2+1+0
( $R_H * C_H$ )	0/2+1+0	1+0/3+2+1
( $L_H * C_H$ )	0/2+1+0	2+0/3+2+1
( $R_H * L_H * C_H$ )	0/2+1+0	2+1+0/3+2+1

Испытаниям с помощью ГИН подвергаются устройства, представляемые различными эквивалентными электрическими схемами. Однако, чаще всего, нагрузка ГИН имеет емкостной характер. В данной работе рассмотрен вариант нагрузки в виде последовательных соединения  $R, L$  и  $C$  элементов.

Для схемы ВИИУ типа ГИН операторные изображения тока и напряжения на нагрузке можно получить используя теорему Миллмана [10].

Для RLC нагрузки:

$$I_H(p) = \frac{p \cdot A_1}{p^4 \cdot B_4 + p^3 \cdot B_3 + p^2 \cdot B_2 + p \cdot B_1 + B_0}; \quad (8)$$

$$U_H(p) = \frac{p^2 \cdot W_2 + p \cdot W_1 + W_0}{p^4 \cdot B_4 + p^3 \cdot B_3 + p^2 \cdot B_2 + p \cdot B_1 + B_0}, \quad (9)$$

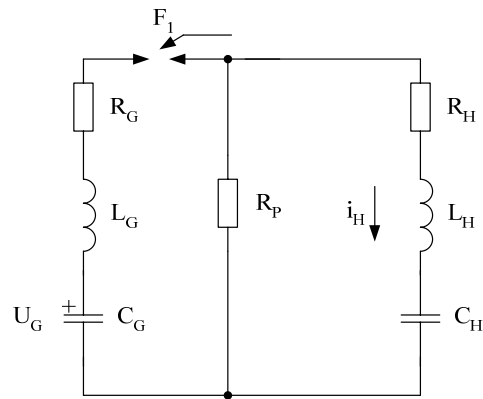


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема разрядной цепи ВИИУ типа ГИН:

$U_G, C_G, L_G, R_G$  – соответственно, зарядное напряжение, емкость, индуктивность и активное сопротивление ГИН;  
 $R_P$  – разрядное сопротивление ГИН

где  $A_1 = U_G \cdot R_P$ ,

$$B_4 = L_G \cdot L_H,$$

$$B_3 = L_G \cdot (R_H + R_P) + L_H \cdot (R_H + R_P),$$

$$B_2 = \frac{L_G}{C_H} + \frac{L_H}{C_G} + R_G \cdot R_H + R_G \cdot R_P + R_H \cdot R_P,$$

$$B_1 = \frac{R_H + R_P}{C_G} + \frac{R_G + R_P}{C_H},$$

$$B_0 = \frac{1}{C_G \cdot C_H},$$

$$W_2 = U_G \cdot R_P \cdot L_H,$$

$$W_1 = U_G \cdot R_P \cdot R_H,$$

$$W_0 = U_G \frac{R_P}{C_H}.$$

При отсутствии какого-либо элемента нагрузки выражения (8) и (9) упрощаются. Для варианта, когда разрядник  $F$  представляет собой идеальный ключ, формальное описание структуры нагрузки и генерируемых импульсных воздействий приведено в табл. 2.

Таблица 2

Описание структуры нагрузки	Описание импульсного воздействия	
	ток в нагрузке	напряжение на нагрузке
( $R_H$ )	0/2+1+0	0/2+1+0
( $L_H$ )	0/3+2+1+0	1/3+2+1+0
( $C_H$ )	1/3+2+1+0	0/3+2+1+0
( $R_H * L_H$ )	0/3+2+1+0	1+0/3+2+1+0
( $R_H * C_H$ )	1/3+2+1+0	1+0/3+2+1+0
( $L_H * C_H$ )	1/4+3+2+1+0	2+0/ 4+3+2+1+0
( $R_H * L_H * C_H$ )	1/4+3+2+1+0	2+1+0/ 4+3+2+1+0

Для формирования импульсных воздействий сложной формы, например,  $f(t) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot e^{-\beta_i t}$ , ис-

пользуются ВИИУ типа ГИТ с последовательно соединенным формирующим двухполосником (FD) [3]. Эквивалентная электрическая схема такого ВИИУ приведена на рис. 3, а общее описание структуры имеет вид

$$\text{СОС}_{\text{ГИТ FD}} = ((R_G * L_G * C_G) * (\text{FD})) \parallel (H). \quad (10)$$

Соотношения для определения операторного изображения импульса тока, протекающего в нагрузке, приведены в [3]. Количество RC - звеньев FD – n определяется степенью сложности описания импульса тока во временной области.

В табл. 3 приведено формальное описание структуры формирующего двухполосника, нагрузки и генерируемых импульсных воздействий для вариантов изменения числа RC – звеньев  $n = 1 \dots 3$ .

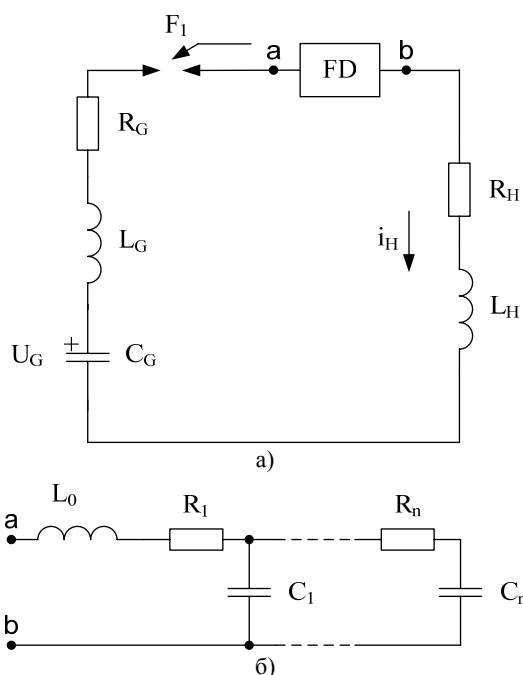


Рис. 3. Эквивалентная схема разрядной цепи ВИИУ типа ГИТ с последовательно включенным формирующим двухполосником:

$U_G, C_G, L_G, R_G$  – соответственно, зарядное напряжение, емкость, индуктивность и активное сопротивление ГИТ; FD – формирующий двухполосник;  $L_0, R_1 \dots R_n, C_1 \dots C_n$  – элементы FD

Для формирования импульсов характеризующихся малым временем нарастания и большой длительностью затухания применяются ВИИУ имеющие комбинированные схемы, содержащие несколько емкостных накопителей энергии. К данному классу относятся ВИИУ типа параллельно работающих двух ГИТ, схема разрядной цепи которых приведена рис. 4. Общее описание структуры разрядной цепи имеет вид

$$\text{СОС}_{\text{2ГИТ}} = (R_{G1} * L_{G1} * C_{G1}) \parallel (R_{G2} * L_{G2} * C_{G2}) \parallel (H). \quad (11)$$

При одновременном срабатывании разрядников  $F_1$  и  $F_2$  операторные выражения тока и напряжения на нагрузке имеют вид.

Для RLC нагрузки

$$I_H(p) = \frac{p^2 \cdot A_2 + p \cdot A_1 + A_0}{p^4 \cdot B_4 + p^3 \cdot B_3 + p^2 \cdot B_2 + p \cdot B_1 + B_0} \quad (12)$$

$$U_H(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{p^4 \cdot W_4 + p^3 \cdot W_3 + p^2 \cdot W_2 + p \cdot W_1 + W_0}{p^4 \cdot B_4 + p^3 \cdot B_3 + p^2 \cdot B_2 + p \cdot B_1 + B_0}, \quad (13)$$

где  $A_2 = U_{G1} \cdot L_{G2} + U_{G2} \cdot L_{G1}$ ,

$$A_1 = U_{G1} \cdot R_{G2} + U_{G2} \cdot R_{G1},$$

$$A_0 = \frac{U_{G1}}{C_{G2}} + \frac{U_{G2}}{C_{G1}},$$

$$B_4 = L_{G1} \cdot L_H + L_{G1} \cdot L_{G2} + L_{G2} \cdot L_H,$$

$$B_3 = R_{G1} \cdot (L_H + L_{G2}) + R_{G2} \cdot (L_H + L_{G1}) + R_H \cdot (L_{G1} + L_{G2}),$$

$$B_2 = \frac{L_H + L_{G2}}{C_{G1}} + \frac{L_H + L_{G1}}{C_{G2}} + \frac{L_{G1} + L_{G2}}{C_H} + R_{G1} \cdot R_H + R_{G1} \cdot R_{G2} + R_{G2} \cdot R_H,$$

$$B_1 = \frac{R_H + R_{G2}}{C_{G1}} + \frac{R_H + R_{G1}}{C_{G2}} + \frac{R_{G1} + R_{G2}}{C_H},$$

$$B_0 = \frac{1}{C_{G1} \cdot C_{G2}} + \frac{1}{C_{G1} \cdot C_H} + \frac{1}{C_{G1} \cdot C_H},$$

$$W_4 = A_2 \cdot L_H, \quad W_3 = A_2 \cdot R_H + A_1 \cdot L_H,$$

$$W_2 = \frac{A_2}{C_H} + A_0 \cdot L_H + A_1 \cdot R_H,$$

$$W_1 = \frac{A_1}{C_H} + A_0 \cdot R_H, \quad W_0 = \frac{A_0}{C_H}.$$

Таблица 3

Описание структуры нагрузки	Описание импульсного воздействия	
	ток в нагрузке	напряжение на нагрузке
(FD)=(R <sub>1</sub> *L <sub>0</sub> *C <sub>1</sub> )		
(R <sub>H</sub> )	0/2+1+0	0/2+1+0
(L <sub>H</sub> )	0/2+1+0	1/2+1+0
(R <sub>H</sub> *L <sub>H</sub> )	0/2+1+0	1+0/2+1+0
(FD)=(R <sub>1</sub> *L <sub>0</sub> *((C <sub>1</sub> )  (R <sub>2</sub> *C <sub>2</sub> )))		
(R <sub>H</sub> )	1+0/3+2+1+0	1+0/3+2+1+0
(L <sub>H</sub> )	1+0/3+2+1+0	2+1/3+2+1+0
(R <sub>H</sub> *L <sub>H</sub> )	1+0/3+2+1+0	2+1+0/ 3+2+1+0
(FD)=(R <sub>1</sub> *L <sub>0</sub> *((C <sub>1</sub> )  (R <sub>2</sub> )  ((C <sub>2</sub> )  (R <sub>3</sub> *C <sub>3</sub> ))))		
(R <sub>H</sub> )	2+1+0/ 4+3+2+1+0	2+1+0/ 4+3+2+1+0
(L <sub>H</sub> )	2+1+0/ 4+3+2+1+0	3+2+1/ 4+3+2+1+0
(R <sub>H</sub> *L <sub>H</sub> )	2+1+0/ 4+3+2+1+0	3+2+1+0/ 4+3+2+1+0

При отсутствии какого-либо элемента нагрузки выражения (12) и (13) упрощаются. Для варианта, когда разрядники  $F_1$  и  $F_2$  представляет собой идеальный ключ, формальное описание структуры разрядной цепи ВИИУ и генерируемых импульсных воздействий приведено в табл. 4.

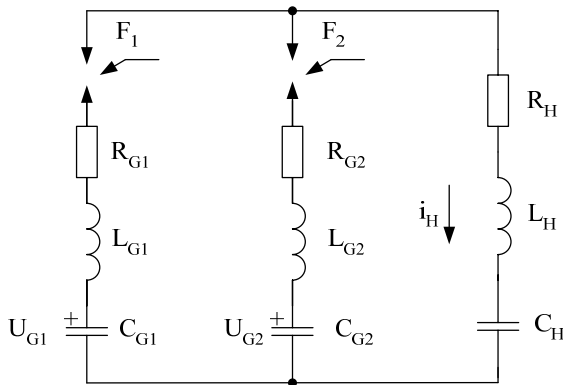


Рис. 4. Эквивалентная схема разрядной цепи ВИИУ типа параллельная работа 2-х ГИТ:  
 $U_{G1}$ ,  $U_{G2}$ ,  $C_{G1}$ ,  $C_{G2}$ ,  $L_{G1}$ ,  $L_{G2}$ ,  $R_{G1}$ ,  $R_{G2}$  – соответственно, зарядное напряжение, емкость, индуктивность и активное сопротивление ГИТов;  $F_1$ ,  $F_2$  – разрядники

Таблица 4

Описание структуры нагрузки	Описание импульсного воздействия	
	ток в нагрузке	напряжение на нагрузке
$(R_H)$	2+1+0/ 4+3+2+1+0	2+1+0/ 4+3+2+1+0
$(L_H)$	2+1+0/ 4+3+2+1+0	3+2+1/ 4+3+2+1+0
$(C_H)$	2+1+0/ 4+3+2+1+0	2+1+0/ 5+4+3+2+1
$(R_H * L_H)$	2+1+0/ 4+3+2+1+0	3+2+1+0/ 4+3+2+1+0
$(R_H * C_H)$	2+1+0/ 4+3+2+1+0	3+2+1+0/ 5+4+3+2+1
$(L_H * C_H)$	2+1+0/ 4+3+2+1+0	4+3+2+1+0/ 5+4+3+2+1
$(R_H * L_H * C_H)$	2+1+0/ 4+3+2+1+0	4+3+2+1+0/ 5+4+3+2+1+0

На основании данных табл. 1 – 4 с использованием программного продукта Excel была сформирована библиотека схемных решений. В качестве примера использования библиотеки определим структуру разрядной цепи ВИИУ, которая позволяет формировать на нагрузке вида  $(R_H * L_H)$  импульс напряжения, формальное описание которого соответствует

$$\text{СОИВ} = 3+2+1+0/4+3+2+1+0. \quad (14)$$

Использование фильтра данных, встроенного в Excel показало, что для этой цели применимы две схемы ВИИУ из приведенных в библиотеке схемных решений:

- ВИИУ типа ГИТ с последовательно включенным формирующим двухполюсником (в дальнейшем принято, что если разбиение строки-описания производится на знаках "\*" и "||", то один знак ставится в конце строки, а второй в начале следующей)

$$\begin{aligned} \text{СОС}_{\text{ВИИУ}} = & ((R_G * L_G * C_G) * \\ & *(R_1 * L_0 * ((C_1) || (R_2) || ((C_2) || (R_3 * C_3)))) || \\ & || (R_H * L_H); \end{aligned} \quad (15)$$

- ВИИУ типа параллельная работа 2-х ГИТ

$$\begin{aligned} \text{СОС}_{\text{ВИИУ}} = & (R_{G1} * L_{G1} * C_{G1}) || \\ & || (R_{G2} * L_{G2} * C_{G2}) || (R_H * L_H). \end{aligned} \quad (16)$$

Преимущество той или иной схемы может быть определено только с привлечением дополнительных критериев, например, энергии, запасаемой ВИИУ.

Такое сравнение производится на стадии параметрического синтеза и выходит за рамки данной работы.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена методика формализации описания импульсных воздействий, формируемых высоковольтными импульсными испытательными устройствами и форма которых идентифицируется аналитическим выражением.

2. Предложена методика формализации описания структуры разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств. Приведено формальное описание структуры генераторов импульсов тока, генераторов импульсов напряжения, генераторов импульсов тока с формирующим двухполюсником и двух генераторов импульсов тока, параллельно работающих на одну нагрузку.

3. Приведен пример определения структуры высоковольтного импульсного испытательного устройства с использованием программного продукта Excel.

Данные статьи можно рассматривать как базу для проведения исследований, направленных на расширение библиотеки схемных решений и полную автоматизацию процедуры структурного синтеза высоковольтных импульсных испытательных устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Диалоговые системы схемотехнического проектирования / В.И. Анисимов, Г.Д. Дмитриевич, К.Б. Скобельцын и др.; Под ред. В.И. Анисимова. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.
- [2] Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку // Электротехника. – 1990. - №10. – С. 35–36.
- [3] 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.
- [4] Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехника та електроенергетика. - 2005. - №1. – С. 65-69.
- [5] Усынин В.И. Структура множества цепей. – К.: Вища школа, 1980. – 104 с.
- [6] Усынин В.И. Структуры цепей в САПР. – К.: Вища шк., 1988. – 166 с.
- [7] Кравченко В.И. Грозазащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
- [8] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров.- СПб.: Лань, 2003. - 832 с.
- [9] ГОСТ 19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 32 с.
- [10] Контарович М.И. Операторное исчисление и процессы в электрических цепях. – М.: Сов. радио, 1975. – 320 с.

Поступила 07.06.2006