

*А.А.ПЕТКОВ*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ СИНТЕЗА РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА**

У роботі наведені результати подальшого розвитку методу невизначених коефіцієнтів стосовно до синтезу розрядних кіл високовольтних імпульсних випробувальних пристроїв

The results of the further development of the undetermined coefficients method applied to the synthesis of high-voltage pulse discharge circuit of test devices are resulted

**Постановка проблемы.** При испытаниях различного электротехнического и электронного оборудования на стойкость к воздействию электромагнитных факторов естественного и искусственного происхождения широко используются высоковольтные импульсные испытательные устройства (ВИИУ), создаваемые на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Многообразие форм воздействующих на оборудование факторов влечет за собой необходимость формирования испытательных импульсов с различными характеристиками, что обуславливает проблему выбора параметров разрядных цепей ВИИУ.

**Анализ публикаций.** Синтезу разрядных цепей ВИИУ при идентификации импульсного воздействия аналитическим выражением посвящен ряд работ. В [1, 2] рассмотрен вариант разрядной цепи, в котором формирование испытательного импульса тока обеспечивается включением последовательно с нагрузкой формирующего двухполюсника. В [3] рассмотрен вариант, когда формирующий двухполюсник подключается параллельно нагрузке.

Работа [4] посвящена комбинаторному подходу к общей задаче синтеза двухполюсников, который имеет ряд преимуществ, однако не адаптирован к требованиям синтеза разрядных цепей ВИИУ.

**Цель** настоящей работы – развитие метода неопределенных коэффициентов, являющегося одной из составляющих комбинаторного подхода, применительно к задаче синтеза разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств.

**Материалы и результаты исследований.** Суть использованной составляющей заключается в сравнении комплексных сопротивлений пассивных двухполюсников с функциями комплексных сопротивлений определенных групп двухполюсников, выборе наиболее подходящего двухполюсника и

определении значений его параметров [4].

Данный подход нами был использован для синтеза разрядной цепи ВИИУ, формирующей импульс напряжения на емкостной нагрузке [5]. При этом часть разрядной цепи относительно зажимов емкостной нагрузки рассматривалась как активный двухполюсник, формирующий на выходе импульс напряжения соответствующий заданному напряжению на нагрузке. Методика определения параметров разрядной цепи ВИИУ состоит в следующем.

1. Для конкретной схемы в общем виде определяется операторное изображение импульса напряжения на емкостной нагрузке, в коэффициенты которого входят параметры элементов схемы.

2. Производится представление импульса напряжения, заданного временной зависимостью, операторным изображением, структурно подобным операторному изображению импульса напряжения на емкостной нагрузке, в коэффициенты которого входят параметры аналитического временного описания импульса напряжения.

3. Приравниваются коэффициенты при одинаковых степенях полиномов числителя и знаменателя операторных изображений и, из полученной системы уравнений, определяются параметры элементов схемы.

Рассмотрим описанную процедуру на примере ВИИУ, схема которого показана на рис. 1.

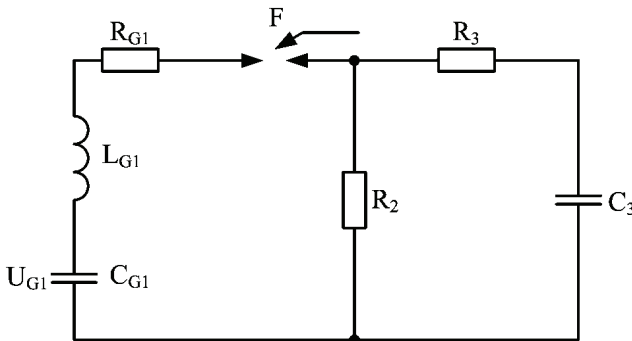


Рисунок 1 – Эквивалентная схема цепи разряда ВИИУ:

$U_{G1}$ ,  $C_{G1}$ ,  $R_{G1}$ ,  $L_{G1}$  – напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность цепи разряда конденсаторов ЕНЭ;  $F$  – коммутатор;  $C_3$  – емкость нагрузки;  $R_2$ ,  $R_3$  – активное сопротивление формирующих элементов

Операторное изображение импульса напряжения на  $C_3$  может быть получено из соотношений, приведенных в [6], что в конечном виде дает:

$$U_{C_3}(p) = \frac{1}{pC_3} \frac{pA_1}{p^3B_3 + p^2B_2 + pB_1 + B_0} = \frac{W_0}{p^3 + p^2N_2 + pN_1 + N_0}, \quad (1)$$

где  $A_1 = U_{G1}R_2$ ;  $B_3 = (R_2 + R_3)L_{G1}$ ;  $B_2 = \frac{L_{G1}}{C_3} + R_{G1}R_3 + R_{G1}R_2 + R_2R_3$ ;

$$B_1 = \frac{R_3 + R_2}{C_{G1}} + \frac{R_{G1} + R_2}{C_3}; \quad B_0 = \frac{1}{C_{G1}C_3};$$

$$W_0 = \frac{A_1}{C_3B_3}; \quad N_2 = \frac{B_2}{B_3}; \quad N_1 = \frac{B_1}{B_3}; \quad N_0 = \frac{B_0}{B_3}.$$

Очевидно, что на нагрузке  $C_3$  может быть сформирован импульс напряжения, операторное изображение которого структурно соответствует (1):

$$u(t) \Leftrightarrow \frac{G_0}{p^3 + p^2Q_2 + pQ_1 + Q_0}. \quad (2)$$

Можно показать, что операторному изображению (2) соответствуют следующие временные зависимости:

$$u(t) = \alpha_1 e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 e^{-\beta_2 t} + \alpha_3 e^{-\beta_3 t}, \quad (3)$$

где  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0$ ;  $\alpha_1\beta_2\beta_3 + \alpha_2\beta_1\beta_3 + \alpha_3\beta_1\beta_2 = 0$ .

$$u(t) = \alpha_1 e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 e^{-\beta_2 t} \sin(\omega t) + \alpha_3 e^{-\beta_2 t} \cos(\omega t), \quad (4)$$

где  $\alpha_1 + \alpha_3 = 0$ ;  $2\alpha_1\beta_2 + \alpha_2\omega + \alpha_3(\beta_1 + \beta_2) = 0$ .

При заданной емкости  $C_3$  и известном операторном изображении импульса напряжения (2), параметры схемы могут быть определены из решения следующей системы нелинейных уравнений, полученных приравнением соответствующих коэффициентов выражений (1) и (2):

$$\begin{cases} G_0 = W_0 = \frac{U_{G1}R_2}{C_3} \frac{1}{(R_2 + R_3)L_{G1}}; \\ Q_2 = N_2 = \frac{\frac{L_{G1}}{C_3} + R_{G1}R_3 + R_{G1}R_2 + R_2R_3}{(R_2 + R_3)L_{G1}}; \\ Q_1 = N_1 = \frac{\frac{R_2 + R_3}{C_{G1}} + \frac{R_{G1} + R_3}{C_3}}{(R_2 + R_3)L_{G1}}; \\ Q_0 = N_0 = \frac{1}{C_{G1}C_3} \frac{1}{(R_2 + R_3)L_{G1}}. \end{cases} \quad (5)$$

Как видно из (5), имеется 4 нелинейных уравнения связи и 6 неизвестных параметров  $U_{G1}$ ,  $C_{G1}$ ,  $R_{G1}$ ,  $L_{G1}$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Решение данной системы возможно путем сведения ее к задаче минимизации следующей целевой функции, составленной из относительных отклонений соответствующих коэффициентов (1) и (2)

$$CF = MAX \left( \left| \frac{G_0 - W_0}{W_0} \right|, \left| \frac{Q_2 - N_2}{N_2} \right|, \left| \frac{Q_1 - N_1}{N_1} \right|, \left| \frac{Q_0 - N_0}{N_0} \right| \right), \quad (6)$$

где  $CF$  – целевая функция;  $MAX[\cdot]$  – функция, возвращающая максимальное значение из введенных аргументов.

Решение задачи ищем в области пространства параметров элементов разрядной цепи, границы которой определяются предельными значениями, допускающими техническую реализацию элементов.

Минимизация целевой функции (6) производится комбинированным методом, предложенным автором в [7, 8], который включает блок случайного поиска. Для границ интервала генерирования случайных значений параметров элементов разрядной цепи, являющихся исходными точками для поиска локального минимума целевой функции, используются значения, вычисляемые из ряда упрощенных схем, полученных из схемы, приведенной на рис. 1.

Для импульса вида (3), при  $\alpha_1 \geq \alpha_2 > 0$  (естественно  $\alpha_3 < 0$ ) и  $\beta_2 > \beta_3 > \beta_1 > 0$ , получен следующий набор значений, ограничивающих интервал генерирования случайных значений параметров.

Нижнюю границу диапазонов изменения  $R_1, R_2, R_3$  примем равными минимальному значению, допускающему техническую реализацию. Верхнюю границу – из соотношений:

$$R_{2\max} = R_{3\max} = \frac{1}{\beta_1 C_3}; \quad R_{1\max} = \frac{1}{\beta_2 C_3}. \quad (7)$$

Границы изменения напряжения зарядки  $C_{G1}$ :

$$U_{G1\min} = \alpha_2; \quad U_{G1\max} = \alpha_1 \frac{(R_{1\max} + R_{2\max})}{R_{2\max}}. \quad (8)$$

Границы изменения емкости  $C_{G1}$ :

$$C_{G1\min} = C_3; \quad C_{G1\max} = C_3 \frac{\alpha_1}{U_{G1\max} - \alpha_1}. \quad (9)$$

Границы изменения индуктивности  $L_{G1}$ :

$L_{G1\min}$  – примем равными минимальному значению, допускающему техническую реализацию;

$$L_{1\max} = \frac{R_{1\max} + R_{2\max}}{\beta_2}. \quad (10)$$

Учитывая, что критерием решения задачи (см. целевую функцию (6)) является не непосредственное совпадение формируемого напряжения с заданным, а близость коэффициентов операторных изображений, было проведено исследование близости заданного и формируемого импульсов в зависимости от значений целевой функции.

На рис. 2 показано изменение импульса напряжения на емкости нагрузки  $C_3 = 5 \cdot 10^{-8}$  Ф в процессе параметрического синтеза разрядной цепи, показанной на рис. 1, по методу неопределенных коэффициентов при формировании импульса напряжения, подобного импульсу фазного тока во вторичной обмотке трансформатора, питающего здание, при поражении молнией мол-

ниеприемника, подсоединенного к заземлителю этого здания [9, 10]

$$u(t) = 6,5 \cdot 10^3 e^{-2,6 \cdot 10^4 t} + 6,5 \cdot 10^3 e^{-7,7 \cdot 10^5 t} - 1,3 \cdot 10^4 e^{-3,98 \cdot 10^5 t} \quad (11)$$

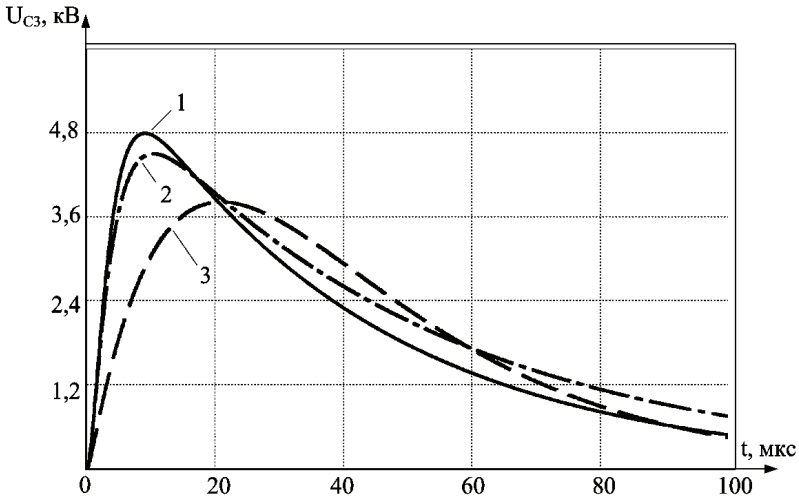


Рисунок 2 – Изменение импульса напряжения от значений целевой функции: 1 – заданный импульс; 2 – значение целевой функции  $CF = 15\%$ ; 3 – значение целевой функции  $CF = 51\%$

В качестве критерия совпадения заданного и формируемого импульса напряжения использовался модуль максимального абсолютного отклонения их значений

$$\Delta = \text{MAX} |U_{C3z} - U_{C3f}|, \quad (12)$$

где  $U_{C3z}$  – значения заданного импульса напряжения;  $U_{C3f}$  – значения формируемого импульса напряжения;  $\text{MAX}[\cdot]$  – функция, возвращающая максимальное значение аргументов.

Изменение значений целевой функции

Значение параметров разрядной цепи						Значение целевой функции, %	$\Delta$ , В
$U_{G1}$ , В	$C_{G1}$ , Ф	$L_{G1}$ , Гн	$R_{G1}$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом		
$1,3 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	4,3	8,9	343,3	51	2287
$6,8 \cdot 10^3$	$6,4 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	10,8	60,9	70,9	15	425
$1,0 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	14,7	19,6	50,4	1,3	48
$7,8 \cdot 10^3$	$6,4 \cdot 10^{-7}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	12,8	44,9	57,6	0,14	7
$8,2 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	15,0	42,4	55,4	0,03	1,5

Данные расчетов приведены в таблице. Как видно из рис. 2 и таблицы,

начиная со значения целевой функции  $CF \approx 1,3\%$ , заданный и формируемый импульсы напряжения становятся практически не различимы.

### **Выводы.**

1. Получил дальнейшее развитие метод неопределенных коэффициентов применительно к синтезу разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств.

2. Показана эффективность разработанного математического аппарата, базирующегося на методах минимизации многомерной многопараметрической целевой функции.

**Список литературы:** 1. *Петков А.А.* Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку / *А.А. Петков* // Электротехника. – 1990. – № 10. – С. 35-36. 2. *Петков А.А.* Формирование испытательных импульсов тока сложной формы / *А.А. Петков* // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 4. – 2004. – С. 22-30. 3. *Петков А.А.* Формирование испытательного импульса тока в активно-индуктивной нагрузке / *А.А. Петков* // Электротехника. – 2006. – № 4. – С. 34-37. 4. *Быструев А.К.* Комбинаторный подход к задаче синтеза пассивных двухполосников / *А.К. Быструев* // Электричество. – 1985. – № 5. – С. 41-46. 5. *Петков А.А.* Разряд емкостного накопителя энергии на R/RC нагрузку / *А.А. Петков, Д.В. Винников* // Труды 5-й международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве» (28-29 мая 2002 года г. Харьков). – Харьков. – 2002. – С. 732-735. 6. *Петков А.А.* Формализация описания структур разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / *А.А. Петков* // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 1. – С. 73-77. 7. *Петков А.А.* Аппроксимация формы импульсных электромагнитных воздействий биекспоненциальной функцией / *А.А. Петков* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – № 49. – 2005. – С. 52-61. 8. *Петков О.О.* Визначення параметрів двошарової моделі ґрунту за результатами вертикального електричного зондування, проведеного в районі розташування підстанцій / *О.О. Петков, Д.Г. Коліушко, І.Ю. Лінк* // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – № 2. – С. 3-11. 9. *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. 10. *Петков А.А.* Формирование импульсов тока, сопровождающих грозовую деятельность / *А.А. Петков, Д.Г. Коліушко* // Технічна електродинаміка. – 2006. – Ч.4., Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – С. 21-24.

*Поступила в редколлегию 27.05.2010.*