

ФОРМИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ НА ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКЕ

У роботі розглянуто формування випробувального імпульсу напруги на ємнісному навантаженні з використанням формуючого двополюсника. Наведено матеріали для вибору структури та значень елементів формуючого двополюсника.

В роботі розглянуто формування испытательного импульса напряжения на емкостной нагрузке с использованием формирующего двухполюсника. Приведены материалы для выбора структуры и значений элементов формирующего двухполюсника.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Одним из путей обеспечения надежной работы электротехнического оборудования является проведение его испытаний на устойчивость к воздействию импульсных электромагнитных факторов, имеющих место в процессе эксплуатации. Такие испытания проводятся с использованием высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ), сооружаемые на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ).

Многообразие форм импульсов, используемых при проведении испытаний, определяет необходимость совершенствования методов выбора параметров разрядных цепей испытательных установок.

Анализ публикаций Испытательные импульсы могут быть заданы аналитическим выражением и контролируемые параметрами [1, 2]. Аналитическое описание позволяет наряду с натурными испытаниями проводить математический анализ реакции технических средств на испытательное воздействие.

Вопросу выбора параметров разрядных цепей испытательных устройств при задании испытательного импульса аналитическим выражением посвящен ряд работ [3 – 8]. В данных публикациях рассматриваются ВИИУ, работающие на активно-индуктивную нагрузку, которая достаточно широко распространена при испытаниях. Однако в практике высоковольтных испытаний значительное место занимают также испытания объектов, имеющих емкостной характер (изоляция конструкции, конденсаторы, кабели и т.п.). Для таких нагрузок разработаны методы выбора параметров разрядных цепей ВИИУ, которые в основном базируются на задании испытательного импульса напряжения контролируемыми параметрами (например, [9]), а синтез разрядных цепей ВИИУ при задании испытательного импульса напряжения аналитическим выражением не нашел достаточно полного отражения в исследованиях.

Целью настоящей работы является получение соотношений для выбора параметров разрядной цепи испытательного устройства, формирующего на емкостной нагрузке импульс напряжения, заданный аналитическим выражением.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим схему испытательного устройства, приведенную на рис. 1. Разрядная цепь ВИИУ включа-

ет: ЕНЭ, параметрами которого являются $U(0)$, C , R , L – соответственно зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность; F – коммутатор (идеальный ключ); C_H – емкость нагрузки; формирующий двухполюсник, который подключается параллельно нагрузке и предназначен для обеспечения требуемых параметров испытательного импульса на ней (Y_{FD} – проводимость формирующего двухполюсника).

Используя операторный метод расчета линейных электрических цепей [10], можно показать, что в данной схеме на емкостной нагрузке может быть сформирован импульс напряжения, для которого операторное изображение по Лапласу имеет вид:

$$U_{ab} = \frac{\sum_{k=0}^{m-3} p^k \cdot A_k}{\sum_{k=0}^m p^k \cdot B_k} \quad (1)$$

где A_k , B_k – коэффициенты полиномов числителя и знаменателя операторного изображения; порядок импульса (наибольшая степень полинома знаменателя [6]) $m \geq 3$.

Данное операторное изображение соответствует импульсам напряжения различной формы, в частности, представимой экспоненциальным полиномом m – го порядка вида [7]:

$$u(t) = \sum_{j=0}^m \alpha_j \cdot e^{-\beta_j t}, \quad (2)$$

где α_j и β_j – коэффициенты формы.

В общем случае, операторное изображение формы импульса напряжения (2) содержит A – коэффициенты вплоть до $(m - 2)$ степени, но в соответствии с (1), соотношение между коэффициентами формы импульса напряжения (2) должно быть таковым, чтобы от нуля отличались только A – коэффициенты при $(m - 3)$ низших степенях операторного изображения (1).

Общие формулы для определения коэффициентов A_k и B_k операторного изображения импульса (2) приведены в [6]. Там же даны частные соотношения для импульсов третьего порядка ($m = 3$). Соотношения для определения коэффициентов операторного изображения (1) импульсов 4-го порядка представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициент	Соотношения для определения коэффициентов
A_0	$\alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 + \alpha_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 + \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_4 + \alpha_4 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3$
A_1	$\alpha_1 \cdot (\beta_2 \cdot \beta_3 + \beta_2 \cdot \beta_4 + \beta_3 \cdot \beta_4) + \alpha_2 \cdot (\beta_1 \cdot \beta_3 + \beta_1 \cdot \beta_4 + \beta_3 \cdot \beta_4) + \alpha_3 \cdot (\beta_1 \cdot \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_4 + \beta_2 \cdot \beta_4) + \alpha_4 \cdot (\beta_1 \cdot \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_3 + \beta_2 \cdot \beta_3)$
A_2	$\alpha_1 \cdot (\beta_2 + \beta_3 + \beta_4) + \alpha_2 \cdot (\beta_1 + \beta_3 + \beta_4) + \alpha_3 \cdot (\beta_1 + \beta_2 + \beta_4) + \alpha_4 \cdot (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)$
B_0	$\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$
B_1	$\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 + \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_4 + \beta_1 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 + \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$
B_2	$\beta_1 \cdot \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_3 + \beta_1 \cdot \beta_4 + \beta_2 \cdot \beta_3 + \beta_2 \cdot \beta_4 + \beta_3 \cdot \beta_4$
B_3	$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4$
B_4	1

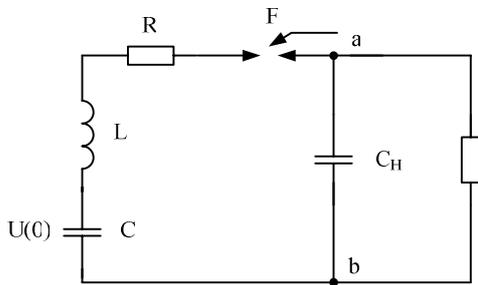


Рис. 1. Схема разрядной цепи ВИИУ

В соответствии с вышеописанными требованиями к коэффициентам операторного изображения импульса (2), для импульса 4-го порядка должно выполняться условие $A_2 = 0$.

Полагая, что заданы параметры ЕНЭ – $U(0)$, C , R , L и аналитическое выражение импульса напряжения на известной емкостной нагрузке C_H , определим структуру и параметры элементов формирующего двухполюсника. Можно показать, что операторная проводимость формирующего двухполюсника определяется из соотношения:

$$Y_{FD} = \frac{\sum_{k=0}^m p^k \cdot V_{0,k}}{\sum_{k=0}^{m-1} p^k \cdot W_{0,k}}, \quad (3)$$

где коэффициенты полиномов числителя и знаменателя имеют вид:

$$\begin{aligned} & \text{– для } 0 \leq k \leq m \\ & V_{0,k} = C \cdot [B_k \cdot U(0) - g(1 \leq k \leq m-2) \cdot A_{k-1}] - \\ & - C_H \cdot [g(1 \leq k \leq m-2) \cdot A_{k-1} + \\ & + g(2 \leq k \leq m-1) \cdot R \cdot C \cdot A_{k-2} - \\ & - g(3 \leq k \leq m) \cdot L \cdot C \cdot A_{k-3}]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{– для } 0 \leq k \leq m-1 \\ & W_{0,k} = g(0 \leq k \leq m-3) \cdot A_k + \\ & + g(1 \leq k \leq m-2) \cdot R \cdot C \cdot A_{k-1} + \\ & + g(2 \leq k \leq m-1) \cdot L \cdot C \cdot A_{k-2}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } g(a \leq k \leq b) = \begin{cases} 1, & k \geq a \wedge k \leq b, \\ 0, & \neg(k \geq a \wedge k \leq b). \end{cases}$$

Для импульсов напряжения третьего и четвертого порядков коэффициенты операторной проводимости (3), определенные из общих соотношений (4) и (5), приведены в табл. 2.

Используя методы синтеза двухполюсников [10] можно показать, что структура формирующего двухполюсника с операторной проводимостью (3) может быть представлена в виде многозвенной цепи, показанной на рис. 2. Цепь содержит два типа звеньев: нечетные, которые представляют собой параллельное соединение емкости (C_k) и проводимости (Y_k), и четные, состоящие из последовательно соединенных индуктивности (L_k) и активного сопротивления (R_k).

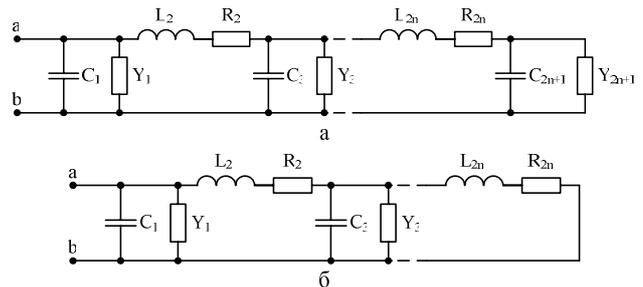


Рис. 2

Причем количество звеньев формирующего двухполюсника равно порядку импульса напряжения. При нечетном порядке импульса цепь заканчивается звеном, состоящем из параллельно соединенных емкости и проводимости (рис. 2а), при четном порядке импульса – последовательно соединенными индуктивностью и активным сопротивлением (рис. 2б). Значения элементов формирующего двухполюсника определяются по соотношениям:

– для нечетных звеньев $k = 1, 3, 5, \dots, 2n + 1$

$$C_k = \frac{V_{k-1,m-(k-1)}}{W_{k-1,m-k}}; \quad (6)$$

$$Y_k = \frac{V_{k,m-k}}{W_{k-1,m-k}}, \quad (7)$$

– для четных звеньев $k = 2, 4, 6, \dots, 2n$

$$L_k = \frac{W_{k-2,m-(k-1)}}{V_{k,m-k}}; \quad (8)$$

$$R_k = \frac{W_{k-1,m-k}}{V_{k,m-k}}. \quad (9)$$

Коэффициенты, входящие в выражения (6) – (9), определяются по следующим рекуррентным соотношениям:

– для нечетных $j = 1, 3, 5, \dots, 2n + 1$

при $1 \leq j \leq m$, $0 \leq s \leq m - j$;

$$V_{j,s} = V_{j-1,s} - \eta(s \geq 1) \cdot V_{j-1,m-j+1} \cdot \frac{W_{j-1,s-1}}{W_{j-1,m-j}}, \quad (10)$$

при $1 \leq j \leq m$, $0 \leq s \leq m - j - 1$

$$W_{j,s} = W_{j-1,s} - \eta(s \geq 1) \cdot W_{j-1,m-j} \cdot \frac{V_{j+1,s-1}}{V_{j+1,m-j-1}}, \quad (11)$$

где $\eta(s \geq 1) = \begin{cases} 1, & s \geq 1, \\ 0, & s < 1. \end{cases}$

– для четных $j = 2, 4, 6, \dots, 2n$
при $2 \leq j \leq m, 0 \leq s \leq m - j$

$$V_{j,s} = V_{j-1,s} - V_{j-1,m-j+1} \cdot \frac{W_{j-2,s}}{W_{j-2,m-j+1}}, \quad (12)$$

при $2 \leq j \leq m, 0 \leq s \leq m - j - 1$

$$W_{j,s} = W_{j-1,s} - W_{j-1,m-j} \cdot \frac{V_{j,s}}{V_{j,m-j}}. \quad (13)$$

Условием физической реализуемости формирующего двухполюсника является положительность всех коэффициентов операторной проводимости (4) и

(5), а также коэффициентов, участвующих в определении значений элементов формирующего двухполюсника (6) – (13) [10].

Для импульсов напряжения третьего порядка выражения (6) – (9) принимают вид:

$$C_1 = \frac{V_{0,3}}{W_{0,2}}, \quad Y_1 = \frac{V_{1,2}}{W_{0,2}}, \quad L_2 = \frac{W_{0,2}}{V_{2,1}}, \quad (14)$$

$$R_2 = \frac{W_{1,1}}{V_{2,1}}, \quad C_3 = \frac{V_{2,1}}{W_{2,0}}, \quad Y_3 = \frac{V_{3,0}}{W_{2,0}}.$$

Значения V и W – коэффициентов определяются по табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

Коэффициент	$m = 3$	$m = 4$
$V_{0,0}$	$C \cdot B_0 \cdot U(0)$	$C \cdot B_0 \cdot U(0)$
$V_{0,1}$	$C \cdot [B_1 \cdot U(0) - A_0] - C_H \cdot A_0$	$C \cdot [B_1 \cdot U(0) - A_0] - C_H \cdot A_0$
$V_{0,2}$	$C \cdot B_2 \cdot U(0) - C_H \cdot R \cdot C \cdot A_0$	$C \cdot [B_2 \cdot U(0) - A_1] - C_H \cdot (A_1 + R \cdot C \cdot A_0)$
$V_{0,3}$	$C \cdot B_3 \cdot U(0) - C_H \cdot L \cdot C \cdot A_0$	$C \cdot B_3 \cdot U(0) - C_H \cdot (R \cdot C \cdot A_1 + L \cdot C \cdot A_0)$
$V_{0,4}$	–	$C \cdot B_4 \cdot U(0) - C_H \cdot L \cdot C \cdot A_1$
$W_{0,0}$	A_0	A_0
$W_{0,1}$	$R \cdot C \cdot A_0$	$A_1 + R \cdot C \cdot A_0$
$W_{0,2}$	$L \cdot C \cdot A_0$	$R \cdot C \cdot A_1 + L \cdot C \cdot A_0$
$W_{0,3}$	–	$L \cdot C \cdot A_1$

Таблица 3

Коэффициент	Соотношения для определения коэффициентов
$V_{1,0}$	$V_{0,0}$
$V_{1,1}$	$V_{0,1} - V_{0,3} \cdot \frac{W_{0,0}}{W_{0,2}}$
$V_{1,2}$	$V_{0,2} - V_{0,3} \cdot \frac{W_{0,1}}{W_{0,2}}$
$V_{2,0}$	$V_{1,0} - V_{1,2} \cdot \frac{W_{0,0}}{W_{0,2}}$
$V_{2,1}$	$V_{1,1} - V_{1,2} \cdot \frac{W_{0,1}}{W_{0,2}}$
$W_{1,0}$	$W_{0,0}$
$W_{1,1}$	$W_{0,1} - W_{0,2} \cdot \frac{V_{2,0}}{V_{2,1}}$
$W_{2,0}$	$W_{1,0} - W_{1,1} \cdot \frac{V_{2,0}}{V_{2,1}}$
$V_{3,0}$	$V_{2,0}$

Рассмотренные выше материалы могут быть использованы для выбора параметров эквивалентной одноступенчатой схемы ГИН, показанной на рис. 3.

Зарядное напряжение $U(0)$ представляет собой сумму зарядных напряжений всех накопительных конденсаторов, емкость C является емкостью ГИН "в ударе", R и L – эквивалентное активное сопротивление и индуктивность разрядников и демпфирующих

резисторов, R_p – разрядное сопротивление ГИН, C_{Π} – паразитная емкость ГИН.

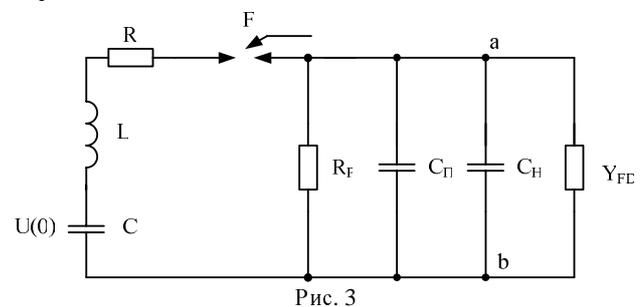


Рис. 3

Учет рассмотренных особенностей ВИИУ, схема которого приведена на рис. 3, при выборе параметров формирующего двухполюсника производится изменением значения элементов его первого звена:

– скорректированное значение емкости первого звена

$$C_1^* = C_1 - C_{\Pi}, \quad (15)$$

где C_1 – значение, рассчитанное по (6).

– скорректированное значение проводимости первого звена

$$Y_1^* = Y_1 - \frac{1}{R_p}, \quad (16)$$

где Y_1 – значение, рассчитанное по (7).

В качестве иллюстрации применения приведенных в статье материалов рассмотрим следующий пример.

Напряжение, воздействующее на изоляционные конструкции при протекании фазного тока во вторич-

ной обмотке трансформатора, питающего здание, в случае поражения молнией молниеприемника, подсоединенного к заземлителю этого здания, может быть описано следующей зависимостью [8] (A_n – нормирующий коэффициент в вольтах; t – время в секундах):

$$u(t) = A_n \left(6,5 \cdot 10^3 \cdot e^{-2,6 \cdot 10^4 \cdot t} + 6,5 \cdot 10^3 \cdot e^{-7,7 \cdot 10^5 \cdot t} - 1,3 \cdot 10^4 \cdot e^{-3,98 \cdot 10^5 \cdot t} \right). \quad (17)$$

Примем величину нормирующего коэффициента $A_n = 1$ В. Тогда коэффициенты операторного изображения импульса (17) принимают следующие значения: $A_0 = 1,8 \cdot 10^{15}$; $B_0 = 7,97 \cdot 10^{15}$; $B_1 = 3,37 \cdot 10^{11}$; $B_2 = 1,19 \cdot 10^6$; $B_3 = 1$. Для $U(0) = 2 \cdot 10^4$ В; $C = 5 \cdot 10^{-5}$ Ф; $R = 0,5$ Ом; $L = 5 \cdot 10^{-7}$ Гн; $C_H = 2 \cdot 10^{-7}$ Ф по соотношениям табл. 2 (при $m = 3$) определим V – и W – коэффициенты операторной проводимости формирующего двухполюсника: $V_{0,0} = 7,97 \cdot 10^{15}$; $V_{0,1} = 2,47 \cdot 10^{11}$; $V_{0,2} = 1,19 \cdot 10^6$; $V_{0,3} = 9,91 \cdot 10^{-1}$; $W_{0,0} = 1,8 \cdot 10^{15}$; $W_{0,1} = 4,5 \cdot 10^{10}$; $W_{0,2} = 4,5 \cdot 10^4$. Далее с использованием соотношения (14) и данных табл. 3 вычислим значения элементов формирующего двухполюсника: $C_1 = 2,2 \cdot 10^{-5}$ Ф; $Y_1 = 4,31$ Ом $^{-1}$; $L_2 = 3,49 \cdot 10^{-6}$ Гн; $R_2 = 3,44$ Ом; $C_3 = 1,19 \cdot 10^{-5}$ Ф; $Y_1 = 1,92$ Ом $^{-1}$.

Моделирование переходного процесса с рассчитанными параметрами, проведенное по программе Micro-Cap, показывает полное совпадение импульса напряжения на емкостной нагрузке с требуемым импульсом (17).

ВЫВОДЫ

1. В работе получил дальнейшее развитие метод формирующего двухполюсника для синтеза разрядной цепи высоковольтного испытательного устройства, которое формирует на емкостной нагрузке импульс напряжения, заданный аналитическим выражением.

2. Показано, что импульс напряжения может быть сформирован с использованием формирующего двухполюсника, подключаемого параллельно емкостной нагрузке.

Материалы, приведенные в работе, могут быть использованы для разработки методов формирования испытательного импульса напряжения на комплексных нагрузках, которые включают емкостной элемент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник / В.И. Кравченко – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
2. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
3. Кравченко В.И. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии / В.И. Кравченко, А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 70 – 75.
4. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку / А.А. Петков // Электротехніка. – 1990. - №10. – С. 35 – 36.
5. Петков А.А. Учет характеристик коммутаторов при анализе и синтезе разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – С. 68 – 72.
6. Петков А.А. Формирование испытательного импульса тока в активно-индуктивной нагрузке / А.А. Петков // Электротехніка. - 2006. - №4. – С. 34 - 37.
7. Петков А.А. Формирование испытательных импульсов тока сложной формы / А.А. Петков // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". - №4. – 2004. – С. 22 – 30.
8. Петков А.А. Формирование импульсов тока, сопровождающих грозовую деятельность / А.А. Петков, Д.Г. Колиущко // Технічна електродинаміка. - 2006. – Ч.4., Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – С. 21 - 24.
9. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / [В.О. Бржезицький, А.В. Ісакова, В.В. Рудаков та ін.]; за ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПИ" – Торнадо, 2005. – 930 с.
10. Бессонов Л.А. Линейные электрические цепи: Учеб. пособие для электротехнич. и радиотехнич. специальностей вузов / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. школа, 1974. – 320 с.

Поступила 21.06.2009

Петков Александр Александрович, 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