

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С ЕМКОСТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Кравченко В.И., д.т.н., проф., 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-13, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния"

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

У роботі розглянуті загальні принципи параметричного синтезу високовольтних імпульсних випробувальних пристроїв та їхня реалізація при виборі параметрів елементів розрядних кіл з ємнісним накопичувачем енергії.

В работе рассмотрены общие принципы параметрического синтеза высоковольтных импульсных испытательных устройств и их реализация при выборе параметров элементов разрядных цепей с емкостным накопителем энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Все возрастающая потребность в проведении испытаний технических средств на устойчивость к воздействию электромагнитных помех различного происхождения обуславливает необходимость постоянного совершенствования эксплуатируемых и разработки новых высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ), создаваемых на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Одной из основных задач, при проектировании новых и модернизации существующих ВИИУ, является синтез их разрядных цепей (РЦ), который обеспечивает требуемое качество функционирования ВИИУ в целом.

Анализ публикаций. Проектная процедура синтеза ВИИУ включает в себя, и, в частности, параметрический синтез электрических схем их РЦ [1]. Под параметрическим синтезом электрической схемы РЦ ВИИУ будем понимать вычислительную процедуру, конечным результатом которой является набор числовых значений параметров элементов электрической схемы РЦ, обеспечивающих формирование в заданной нагрузке импульса тока (ИТ) с требуемыми амплитудно-временными характеристиками. Вопросы параметрического синтеза в той или иной степени рассмотрены в ряде работ [3 - 9].

Как известно, амплитудно-временные параметры ИТ могут быть описаны как аналитическим выражением, так и набором контролируемых параметров. Наиболее общие требования к формируемому ИТ изложены в [2]. В [3 - 6] рассмотрены различные аспекты выбора параметров схем, генерирующих ИТ, заданных аналитическим выражением. Работы [7, 8] посвящены методикам выбора параметров схемы при задании ИТ контролируемыми параметрами. В [9] предложена иерархическая структура параметрического синтеза ВИИУ, которая включает три уровня, каждый из которых отличается степенью детализации процедуры синтеза. Более частные вопросы выбора параметров РЦ ВИИУ рассмотрены в большом количестве других работ. Наличие такого значительного по объему материала объективно требует рассмотрения задачи выбора параметров с единых позиций, структурирующих и формализующих ее решение.

Целью настоящей работы является разработка методики выбора параметров разрядной цепи, реализующей общие принципы параметрического синтеза высоковольтных импульсных испытательных устройств.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЕЙ ВИИУ

Как показал проведенный анализ, в литературе имеется обширный материал, освещающий различные аспекты процесса проектирования ВИИУ, включающий синтез РЦ. Такое многообразие позволяет провести систематизацию и сформулировать общие принципы параметрического синтеза разрядных цепей ВИИУ, под которыми будем понимать наиболее общие положения, опираясь на которые следует производить параметрический синтез.

1. *Принцип минимизации энергии, запасаемой в ЕНЭ испытательного устройства.* Данный принцип многократно ранее декларировался в ряде известных работ, как составляющая способов многокритериальной оптимизации ВИИУ, например [15, 16].

2. *Принцип учета способа идентификации ИТ.* Необходимость выделения этого принципа логически обоснована в ряде работ авторов, как факт удовлетворения практических потребностей проектирования процесса испытаний [2 - 4].

3. *Принцип учета направленности практической потребности.* Вытекает из запросов практики проектирования ВИИУ и реализуется в виде двух практических требований: модернизация действующих [13] и создание новых ВИИУ [4].

4. *Принцип иерархичности подхода к параметрическому синтезу.* Суть которого в частности изложена в [9].

Рассмотрим методику синтеза ВИИУ содержащего один ЕНЭ, которая базируется на изложенных выше принципах. Под методикой параметрического синтеза схемы разряда ЕНЭ будем понимать совокупность методов и приемов, применение которых при проектировании процессов испытания с различными исходными данными позволяет наиболее целесообразным образом определять параметры элементов схемы при заданных характеристиках нагрузки и требованиях к ИТ.

Согласно принципу иерархичности параметрического синтеза начинается с синтеза эквивалентной электрической схемы исходя из номинальных значений параметров ИТ. Произведем решение этой задачи на базе принципа учета способа идентификации ИТ: аналитического описания и задания контролируемых параметров, характеризующих форму импульса.

СИНТЕЗ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ПРИ АНАЛИТИЧЕСКОМ ЗАДАНИИ ИМПУЛЬСА ТОКА

В общем случае большинство испытательных ИТ аналитически могут быть описаны экспоненциальными полиномами вида [2]

$$i(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot e^{-\beta_j t} \cdot \sin(\omega_j \cdot t - \phi_j), \quad (1)$$

где $\beta_j > 0$, $\omega_j \geq 0$, причем $i(0) = 0$ и $i(\infty) = 0$.

Формирование ИТ сложной формы в последовательной RL -нагрузке с помощью ЕНЭ в общем случае может быть осуществлено только с использованием корректирующих элементов, вводимых в цепь разряда ЕНЭ. Для выбора величины параметров элементов эквивалентной электрической схемы, обеспечивающей протекание в нагрузке ИТ, заданного аналитическим выражением вида (1), был разработан метод формирующего двухполосника (ФД). Данный метод базируется на общих принципах синтеза электрических цепей и позволяет определять вид, количество и величину параметров элементов ФД исходя из параметров ЕНЭ, нагрузки и ИТ. В [3, 4] рассмотрен вариант включения ФД последовательно с нагрузкой (см. рис. 1), в [5] – параллельно нагрузке (см. рис. 2). Предложенный метод позволяет определять тип применяемой в ФД цепочечной схемы, количество ее однотипных звеньев – kz (см. рис. 1б и рис. 2б) и процедуру нахождения величины параметров элементов ФД (операторы $F_j[\cdot]$, $\Phi_j[\cdot]$, $\Psi_j[\cdot]$ в левой части неравенств системы (2)).

$$\begin{cases} R_j = F_j[\overline{P_{И}}, R_{Н}, L_{Н}, R_G, L_G, C_G, U_G(0)] \geq R^* > 0; \\ L_j = \Phi_j[\overline{P_{И}}, R_{Н}, L_{Н}, R_G, L_G, C_G, U_G(0)] \geq L^* > 0; \\ C_j = \Psi_j[\overline{P_{И}}, R_{Н}, L_{Н}, R_G, L_G, C_G, U_G(0)] \geq C^* > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где R_j, L_j, C_j – параметры ФД; $R_{Н}, L_{Н}$ – параметры нагрузки; $\overline{P_{И}}$ – параметры импульса; $R_G, L_G, C_G, U_G(0)$ – параметры ЕНЭ; R^*, L^*, C^* – граничные значения параметров элементов, допускающие техническую реализацию при используемом уровне технологии изготовления элементов и заданных экономических требованиях по затратам на их изготовление.

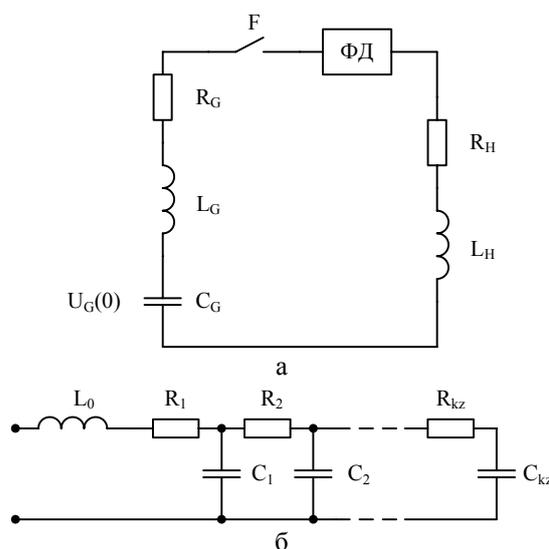


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема разрядной цепи испытательной установки с ФД, включенным последовательно с нагрузкой: а – схема установки; б – схема ФД

На величину элементов ФД накладываются условия физической и технической реализуемости [4, 5], которые могут быть записаны в виде (2).

Как отмечалось выше, в практике проектирования испытательных устройств возникают две задачи:

- 1) задача перевода эксплуатируемой испытательной установки в режим работы с новой нагрузкой и / или новой формой ИТ;
- 2) задача выбора параметров ЕНЭ вновь проектируемых испытательных установок при заданных параметрах ИТ и нагрузки.

Решение этих задач является реализацией принципа учета направленности практической потребности.

Решение первой задачи сводится к проверке выполнения условий (2). Если условия (2) выполняются, то процедура синтеза эквивалентной схемы разрядной цепи считается завершённой. В противном случае производится поиск решения на множестве значений параметров ЕНЭ, которое включает диапазон возможного изменения зарядного напряжения $U_G(0)$ и набор дискретных значений $\{R_G\}, \{L_G\}, \{C_G\}$, получаемых в результате перекоммутации конденсаторов в ЕНЭ. Если на данном множестве решение не существует, то следует констатировать невозможность формирования в заданной нагрузке требуемого ИТ с использованием существующего ЕНЭ. Возможно, что на рассматриваемом множестве имеется несколько решений, удовлетворяющих (2). В этом случае выбирается вариант с минимальной запасаемой энергией.

В общем случае решение задачи представляет определенные сложности и производится методами дискретного программирования [10].

Примеры решения задачи при описании ИТ суммой трех экспонент рассмотрены в [5, 6].

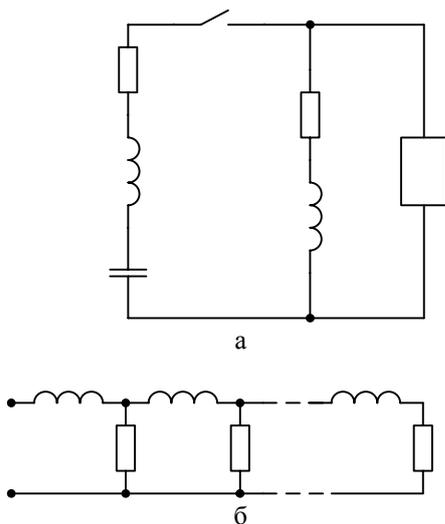


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема разрядной цепи испытательной установки с ФД, включенным параллельно нагрузке:
а – схема установки; б – схема ФД

Для схемы с последовательным включением ФД и ИТ вида

$$i(t) = I \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (3)$$

где $I, \alpha, \omega > 0$

$$i(t) = I \cdot (e^{-\alpha_1 \cdot t} - e^{-\alpha_2 \cdot t}), \quad (4)$$

где $I, \alpha_1, \alpha_2 > 0$

было получено относительно простое решение.

Можно показать, что при переводе эксплуатируемой испытательной установки с параметрами ЕНЭ $R_G, L_G, C_G, U_G(0)$ в режим работы с новой нагрузкой и / или новой формой ИТ вида (3) или (4), в разрядную цепь необходимо ввести ФД, который состоит из ветви, включающей последовательно соединенные индуктивность L_0 и одно RC -звено (см. рис. 16), а параметры его элементов для ИТ вида (3) определяются из соотношений (5).

Аналогичные соотношения для ИТ вида (4) приведены в [3].

Как видно из (5), величины параметров элементов ФД зависят от величины зарядного напряжения $U_G(0)$. Это позволяет его уменьшением минимизировать запасаемую энергию (естественно при этом должны удовлетворяться условия технической реализуемости либо исключаться из разрядной цепи соответствующие элементы при $R_1 = 0, L_0 = 0, C_1 = \infty$). Подбор величины $U_G(0)$ осуществляется методами решения систем нелинейных уравнений, например описанными в [11]. Данная процедура позволяет реализовать принцип минимизации энергии.

Формирующую емкость C_1 , определенную по (5) целесообразно не вводить в разрядную цепь, а реализовать путем отключения части конденсаторов ЕНЭ (если это допускается его конструкцией) таким образом, чтобы новая величина емкости ЕНЭ определялась по (6).

$$F \begin{cases} L_0 = \frac{U_G(0)}{I \cdot \omega} - L_G - L_H; \\ R_1 = \frac{2 \cdot U_G(0) \cdot \alpha}{I \cdot \omega} - R_G - R_H; \\ C_1 = \frac{1}{\frac{U_G(0)}{I \cdot \omega} \cdot (\alpha^2 + \omega^2) - \frac{1}{C_G}}. \end{cases} \quad (5)$$

$$R_G^* = \frac{C_G}{1 + \frac{C_G}{C_1}}. \quad (6)$$

Вторая задача (выбор параметров вновь сооружаемых ЕНЭ) является задачей нелинейного программирования, и формулируется следующим образом.

Постановка задачи. Требуется выбрать параметры ЕНЭ такими, чтобы удовлетворялись некоторые минимаксные критерии при выполнении условий (2) и условий технической реализуемости элементов ЕНЭ

$$R_G \geq R^*, \quad L_G \geq L^*, \quad C_G \geq C^*, \quad 0 < U_G(0) \leq U^*.$$

В общем случае ее решение возможно только с использованием численных методов нелинейного программирования [10].

В качестве минимаксного критерия целесообразно использовать минимальность запасаемой энергии, так как этот критерий, в силу специфики высоковольтного оборудования, определяет стоимостные и массогабаритные показатели испытательной установки в целом.

Для схемы с последовательным включением ФД и ИТ вида (3) параметры элементов вновь сооружаемых ЕНЭ определяются из соотношений, получаемых из (5), если положить $R_1 = 0, L_0 = 0, C_1 = \infty$

$$\begin{cases} R_G = \frac{2 \cdot U_G(0) \cdot \alpha}{I \cdot \omega} - R_H; \\ L_G = \frac{U_G(0)}{I \cdot \omega} - L_H; \\ C_G = \frac{I \cdot \omega}{U_G(0)} \cdot \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2}. \end{cases} \quad (7)$$

Аналогичные соотношения для ИТ вида (4) приведены в [3].

Если при принятом уровне зарядного напряжения $U_G(0)$ параметры элементов ЕНЭ R_G, L_G, C_G допускают техническую реализацию, то энергия, запасаемая в ЕНЭ является минимальной и достаточной для формирования требуемого ИТ в заданной нагрузке. В случае, если имеются основания полагать, что рассчитанные по (7) значения R_G, L_G превышают реальные значения, которые могут быть получены при сооружении ЕНЭ, то в качестве R_G, L_G принимаем реальные значения и далее осуществляется проверка возможности формирования ИТ при принятых параметрах ЕНЭ (решение первой задачи).

В качестве примера, иллюстрирующего рассмотренную методику, произведем синтез разрядной цепи для формирования ИТ вида (3), близкого по характе-

ристикам к ИТ, используемому при испытаниях технических средств на устойчивость к колебательным импульсным помехам [12], с помощью генератора ГИТ-5, эксплуатируемого на экспериментальной базе НИПКИ "Молния" [13].

Постановка задачи. Для генератора ГИТ-5, выполненного на базе ЕНЭ и имеющего собственные параметры $R_G = 0,179$ Ом, $L_G = 2 \cdot 10^{-5}$ Гн, $C_G = 7,8 \cdot 10^{-3}$ Ф, $U_G(0) = 5 \cdot 10^3$ В, требуется выбрать параметры ФД таким образом, чтобы в нагрузке с параметрами $R_H = 0,05$ Ом, $L_H = 1 \cdot 10^{-6}$ Гн протекал ИТ вида (3) с параметрами $I = 350$ А, $\alpha = 1,02 \cdot 10^5$ с⁻¹, $\omega = 6,28 \cdot 10^5$ с⁻¹.

Расчеты, проведенные с использованием исходных данных и соотношений (5), показывают, что параметры ФД имеют следующие значения $L_0 = 1,75 \cdot 10^{-6}$ Гн, $R_1 = 4,41$ Ом, $C_1 = 1,09 \cdot 10^{-7}$ Ф. Моделирование переходного процесса в цепи с рассчитанными параметрами показало удовлетворительное совпадение с заданной формой.

СИНТЕЗ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ПРИ ЗАДАНИИ ИМПУЛЬСА ТОКА КОНТРОЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Идентификация испытательных ИТ контролируемыми параметрами включает в себя требования к значениям ИТ в определенные моменты времени (чаще всего максимальное значение – i_{\max} и требования к величине временных параметров, номенклатура которых зависит от вида испытуемого объекта и целей проводимых испытаний. Чаще всего в качестве контролируемых временных параметров используют параметр, характеризующий нарастание значений ИТ – $t_{\text{нар}}$ и параметр, характеризующий спад значений ИТ – $t_{\text{сп}}$. В качестве $t_{\text{нар}}$ чаще всего используют следующие контролируемые параметры (способы определения $t_{\text{нар}}$ и $t_{\text{сп}}$ по осциллограмме тока приведены в [7, 8]): T_{\max} – время достижения максимального значения тока; $T_{H(0,1;0,9)}$ – время нарастания значений ИТ на фронте от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения ИТ; $T_{H(0,3;0,9)}$ – время нарастания значений ИТ на фронте от уровня 0,3 до уровня 0,9 от максимального значения ИТ; $T_{Ф(0,1;0,9)}$ ($T_{Ф(0,3;0,9)}$) – длительность фронта ИТ определяемая по уровням 0,1 и 0,9 (0,3 и 0,9); $T_{C0,5}$ – время достижения на спаде импульса уровня 0,5 от максимального значения ИТ; $T_{И(0,1;0,9;0,5)}$ ($T_{И(0,3;0,9;0,5)}$) – длительность импульса, определяемая по уровням 0,1 и 0,9 на фронте и уровню 0,5 на спаде импульса (0,3 и 0,9 на фронте и 0,5 на спаде); $T_{И0,5}$ ($T_{И0,9}$) – длительность импульса, определяемая по уровням 0,5 на фронте и спаде импульса (уровням 0,9 на фронте и спаде импульса). Перечень основных комбинаций контролируемых временных параметров, с помощью которых идентифицируется ИТ, и методика выбора величины параметров разрядной цепи ЕНЭ описана в [7, 8].

Схемы разрядных цепей ряда испытательных установок с той или иной степенью приближения могут быть представлены последовательной RLC-цепью. Можно показать, что если известно зарядное напряжение ЕНЭ $U_G(0)$, то остальные эквивалентные параметры разрядной цепи (суммарное сопротивление – R ,

суммарная индуктивность – L , или емкость – C) для варианта формирования ИТ с контролируемыми параметрами i_{\max} , $t_{\text{нар}}$, $t_{\text{сп}}$ определяются из соотношений

$$R = \frac{U_G(0) \cdot I_{\max} \cdot r}{i_{\max}}; \quad L = \frac{U_G(0) \cdot I_{\max} \cdot t_{\text{нар}}}{i_{\max} \cdot \tau_{\text{нар}}}; \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{U_G(0)} \cdot \frac{i_{\max}}{I_{\max}} \cdot \frac{t_{\text{нар}}}{\tau_{\text{нар}}},$$

где $\tau_{\text{нар}}$ – безразмерный аналог величины $t_{\text{нар}}$, (τ_{\max} , $\tau_{H(0,1;0,9)}$, $\tau_{H(0,3;0,9)}$, $\tau_{Ф(0,1;0,9)}$, $\tau_{Ф(0,3;0,9)}$); r , I_{\max} – безразмерные аналоги соответственно величин R и i_{\max} .

Для определения величины безразмерных параметров r , I_{\max} , $\tau_{\text{нар}}$ с помощью методики, изложенной в [7], были получены формулы:

$$r = A \cdot \ln \left(\frac{t_{\text{сп}}}{t_{\text{нар}}} \right) + B, \quad (9)$$

где A и B – коэффициенты, определяемые по табл. 1 в зависимости от комбинации контролируемых временных параметров и интервала их варьирования.

Среднее квадратическое отклонение параметра r , определенного по (9) и данным табл. 1 составляет $\sigma_r = 0,05$.

$$I_{\max} = A_4 \cdot \left(\frac{t_{\text{сп}}}{t_{\text{нар}}} \right)^4 + A_3 \cdot \left(\frac{t_{\text{сп}}}{t_{\text{нар}}} \right)^3 + A_2 \cdot \left(\frac{t_{\text{сп}}}{t_{\text{нар}}} \right)^2 + A_1 \cdot \frac{t_{\text{сп}}}{t_{\text{нар}}} + A_0; \quad (10)$$

Таблица 1

$\frac{t_{\text{сп}}}{t_{\text{нар}}}$		A	B
обозначение	интервал изменения		
$\frac{T_{И(0,1;0,9;0,5)}}{T_{Ф(0,1;0,9)}}$	от 2,07 до 3,79	3,2826	- 2,3624
$\frac{T_{И(0,3;0,9;0,5)}}{T_{Ф(0,3;0,9)}}$	от 2,00 до 3,47	3,6054	- 2,4537
$\frac{T_{C0,5}}{T_{H(0,1;0,9)}}$	от 2,57 до 4,68	3,2889	- 3,0678
$\frac{T_{C0,5}}{T_{\max}}$	от 1,66 до 2,66	4,1911	- 2,091
$\frac{T_{C0,5}}{T_{H(0,3;0,9)}}$	от 3,23 до 5,56	3,6155	- 4,1662
$\frac{T_{И0,5}}{T_{\max}}$	от 1,33 до 2,43	3,2836	- 0,9178
$\frac{T_{И0,5}}{T_{H(0,1;0,9)}}$	от 2,04 до 4,28	2,7013	- 1,9272
$\frac{T_{И0,9}}{T_{\max}}$	от 0,57 до 0,90	4,0356	2,2978

$$\tau_{\text{нар}} = B_3 \cdot \left(\frac{t_{\text{сн}}}{t_{\text{нар}}}\right)^3 + B_2 \cdot \left(\frac{t_{\text{сн}}}{t_{\text{нар}}}\right)^2 + B_1 \cdot \frac{t_{\text{сн}}}{t_{\text{нар}}} + B_0, \quad (11)$$

где $A_4 \dots A_0, B_3 \dots B_0$ – коэффициенты, определяемые по табл. 2 в зависимости от комбинации контролируемых временных параметров (диапазон их изменения соответствует табл. 1).

Среднее квадратическое отклонение параметров вычисленных по формулам (13) и (14) и данных табл. 2 составляет $\sigma_{I_{\text{max}}} = 0,02, \sigma_{\tau_{\text{нар}}} = 0,005$.

Для вычисления безразмерных параметров $r, I_{\text{max}}, \tau_{\text{нар}}$ при больших значениях отношения $\frac{t_{\text{сн}}}{t_{\text{нар}}}$ могут

быть использованы соотношения из [7, 8] или общая методика, описанная в [7].

Перевод испытательной установки в новый режим эксплуатации производится на базе известных значений параметров ЕНЭ – $R_G, L_G, C_G, U_G(0)$, параметров нагрузки – R_H, L_H и ИТ – $i_{\text{max}}, t_{\text{нар}}, t_{\text{сн}}$. В

этом случае мы фактически приходим к задаче, рассмотренной в предыдущем разделе, с той лишь разницей, что вместо (5) используются следующие выражения для вычисления величины параметров элементов ФД, полученные с использованием (8)

$$\begin{cases} L_0 = \frac{U_G(0) \cdot I_{\text{max}} \cdot t_{\text{нар}}}{i_{\text{max}} \cdot \tau_{\text{нар}}} - L_G - L_H; \\ R_1 = \frac{U_G(0) \cdot I_{\text{max}} \cdot r}{i_{\text{max}}} - R_G - R_H; \\ C_1 = \frac{1}{\frac{U_G(0) \cdot I_{\text{max}} \cdot \tau_{\text{нар}}}{i_{\text{max}} \cdot t_{\text{нар}}} - \frac{1}{C_G}}. \end{cases} \quad (12)$$

Аналогично для задачи выбора параметров вновь проектируемого ЕНЭ используется решение из предыдущего раздела, с использованием вместо (7) следующих соотношений, полученных из (12), если положить $R_1 = 0, L_0 = 0, C_1 = \infty$

Таблица 2

$\frac{t_{\text{сн}}}{t_{\text{нар}}}$	I_{max}					$\tau_{\text{нар}}$			
	A_4	A_3	A_2	A_1	A_0	B_3	B_2	B_1	B_0
$\frac{T_{И(0,1;0,9;0,5)}}{T_{Ф(0,1;0,9)}}$	0,1846	- 2,3554	11,302	- 24,361	20,495	-0,0926	0,9845	- 3,6393	5,4058
$\frac{T_{И(0,3;0,9;0,5)}}{T_{Ф(0,3;0,9)}}$	0,3415	- 4,0456	18,024	- 36,002	27,798	-0,1354	1,3211	- 4,488	6,1252
$\frac{T_{C0,5}}{T_{H(0,1;0,9)}}$	0,0868	- 1,3674	8,0877	- 21,446	22,112	-0,0438	0,5676	- 2,5479	4,5568
$\frac{T_{C0,5}}{T_{\text{max}}}$	1,0991	- 10,458	37,461	- 60,149	37,111	-0,4881	3,6702	- 9,4709	9,4117
$\frac{T_{C0,5}}{T_{H(0,3;0,9)}}$	0,0632	- 1,1969	8,5098	- 27,04	32,995	-0,025	0,3822	- 2,0168	4,1742
$\frac{T_{И0,5}}{T_{\text{max}}}$	0,5412	- 4,6751	15,291	- 22,683	13,412	-0,2825	1,9715	- 4,8418	5,1793
$\frac{T_{И0,5}}{T_{H(0,1;0,9)}}$	0,0584	- 0,8239	4,379	- 10,541	10,262	-0,0318	0,3801	- 1,6101	2,9906
$\frac{T_{И0,9}}{T_{\text{max}}}$	50,731	- 159,74	190,93	- 103,9	22,401	-2,7566	8,6119	- 9,7736	4,844

$$\begin{cases} L_G = \frac{U_G(0) \cdot I_{\text{max}} \cdot t_{\text{нар}}}{i_{\text{max}} \cdot \tau_{\text{нар}}} - L_H; \\ R_G = \frac{U_G(0) \cdot I_{\text{max}} \cdot r}{i_{\text{max}}} - R_H; \\ C_G = \frac{i_{\text{max}} \cdot t_{\text{нар}}}{U_G(0) \cdot I_{\text{max}} \cdot \tau_{\text{нар}}}. \end{cases} \quad (13)$$

В качестве примера, иллюстрирующего рассмотренную методику, произведем синтез разрядной цепи для формирования ИТ, используемого при испытаниях технических средств на устойчивость к микросе-

кундным импульсным помехам большой энергии [14], с помощью генератора ГИТ-100, эксплуатируемого на экспериментальной базе НИПКИ "Молния" [13].

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 $R_H = 0,05 \text{ Ом}, L_H = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ протекал ИТ с параметрами $T_{И 0,5} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ с}, T_{H (0,1;0,9)} = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}, i_{\text{max}} = 2000 \text{ А}$.

Расчеты, проведенные с использованием исходных данных и соотношений (12), показывают, что

параметры ФД имеют следующие значения $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-4}$ Гн, $R_1 = 16,1$ Ом, $C_1 = 2,21 \cdot 10^{-7}$ Ф. Компьютерное моделирование переходного процесса в цепи с рассчитанными параметрами показало удовлетворительное совпадение рассчитанных значений амплитудно-временных параметров ИТ с заданными.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа и систематизации знаний в области проектирования ВИИУ уточнены известные и сформулированы новые принципы параметрического синтеза схем ВИИУ.

2. Выведены соотношения для выбора величины параметров элементов РЦ ВИИУ при задании ИТ рядом аналитических выражений и контролируемыми параметрами.

3. Предложена методика параметрического синтеза эквивалентных схем при задании ИТ аналитическим выражением.

4. Предложена методика, обеспечивающая синтез эквивалентных электрических схем при всех основных способах задания контролируемых параметров ИТ во всех практически используемых диапазонах их соотношений.

Использование приведенных в работе материалов позволит разработать методики синтеза РЦ других типов ВИИУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Диалоговые системы схемотехнического проектирования / В.И. Анисимов, Г.Д. Дмитриевич, К.Б. Скобелцын и др.; Под ред. В.И. Анисимова. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.
- [2] Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
- [3] Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку // Электротехника. – 1990. - №10. – С. 35 – 36.
- [4] Петков А.А. Формирование испытательных импульсов тока сложной формы // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". - №4. – 2004. – С. 22 – 30.
- [5] Петков А.А. Формирование испытательного импульса тока в активно-индуктивной нагрузке // Электротехника. - 2006. - №4. – С. 34 - 37.
- [6] Петков А.А., Колиушко Д.Г. Формирование импульсов тока, сопровождающих грозовую деятельность// Технічна електродинаміка. - 2006. – Ч.4., Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – С. 21 - 24.
- [7] Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехніка та електроенергетика. - 2005. - №1. – С. 65 - 69.
- [8] Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств при различных способах задания контролируемых параметров испытательных импульсов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" – Харків: НТУ "ХПИ". - №17. – 2006. – С. 105 – 111.
- [9] Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтных импульсных испытательных устройств // Труды 12-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии" (7-8 июня 2006 года г. Харьков). – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2006. – С. 224 – 226.
- [10] Зайченко Ю.П. Исследование операций. – К.: Выща шк., 1988. – 552 с.
- [11] Копченкова Н.В., Марон И.А. Вычислительная математика в примерах и задачах. – М.: Наука, 1972. – 367 с.
- [12] ГОСТ Р 51317.412-99 Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2000. – 28 с.
- [13] 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.
- [14] ГОСТ 30804.4.5-2002 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний. Межгосударственный стандарт. Зарегистрирован №4384 17 марта 2003 г. – Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. – 22 с.
- [15] Губарев Г.Г., Северин В.П. Оптимизация параметров импульсных источников питания // Электричество. – 1983. - №1. – С. 64 – 65.
- [16] Губарев Г.Г., Конотоп В.В. Трехкритериальная оптимизация импульсных источников питания // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. - №6. – С. 66 – 73.

Поступила 14.03.2007