УДК 621.31

А.А. Петков

МОДИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ПЕРЕВОДЕ ИХ В НОВЫЙ РЕЖИМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

У статті запропоновано метод модифікації параметрів багатоконтурних випробувальних пристроїв при їхньому переведенні в новий режим експлуатації. Показано застосування методу для випробувальних пристроїв з активно-індуктивним навантаженням.

В статье предложен метод модификации параметров многоконтурных испытательных устройств при их переводе в новый режим эксплуатации. Показана применимость метода для испытательных устройств с активно-индуктивной нагрузкой.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. В настоящее время испытания технических средств на устойчивость к дестабилизирующим электромагнитным факторам осуществляются с использованием широкой номенклатуры импульсных воздействий, конкретное применение которых определяется видом и назначением испытуемых объектов.

Такого рода испытания проводятся в испытательных лабораториях и центрах, оснащенных специальным оборудованием – высоковольтными импульсными испытательными устройствами (ВИИУ).

Форма испытательных воздействий, формируемых ВИИУ, в общем случае зависит как от параметров ВИИУ, так и от параметров нагрузки (испытуемого объекта). Наличие широкого диапазона изменения параметров испытуемых объектов объективно приводит к необходимости корректировки в процессе эксплуатации параметров разрядной цепи существующих ВИИУ для удовлетворения требований к формируемому импульсному воздействию.

Анализ публикаций. Большинство ВИИУ, формирующих импульсы тока (магнитного поля) мили- и микросекундного диапазона конструктивно представляет собой несколько емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), которые параллельно разряжаются на нагрузку [1 – 3]. Эквивалентная схема таких испытательных устройств показана на рис. 1.

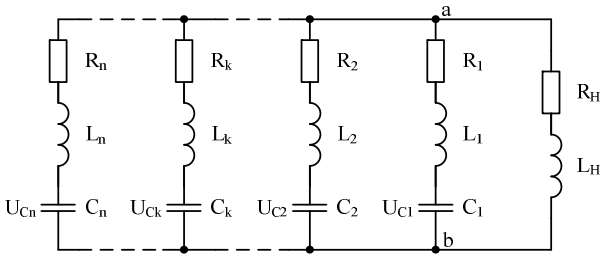

Рис. 1. Эквивалентная схема испытательного устройства

Обычно испытательные импульсы тока, формируемые в таких устройствах, задаются набором контролируемых амплитудно-временных параметров (АПВ) либо аналитическим выражением [4, 5]. Характерные формируемые импульсы тока и их АВП показаны на рис. 2 [4].

Выбор параметров разрядной цепи при проектировании новых ВИИУ рассмотрен в ряде работ, например [6 – 8].

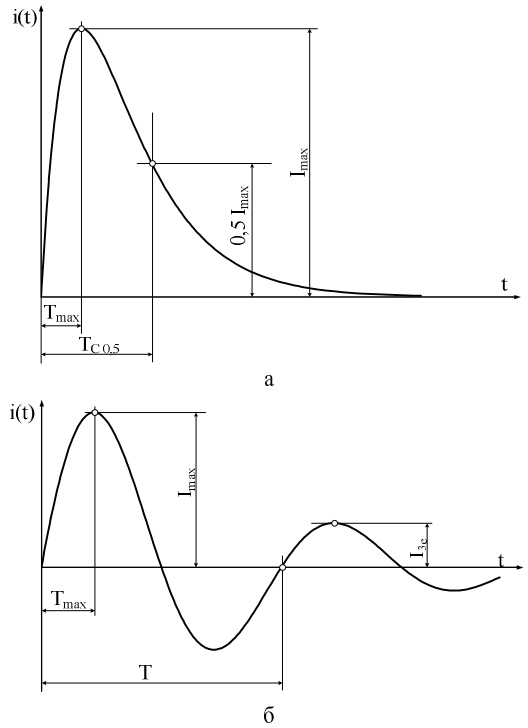

Рис. 2. Типовые формы испытательных импульсов тока и их АВП

Однако в практике проведения испытаний имеет место также задача перевода существующих ВИИУ в режим эксплуатации с новой нагрузкой и / или новой формой импульса тока [7, 9]. Корректировка параметров одноконтурных ВИИУ при его переводе в новый режим эксплуатации рассмотрена в ряде работ, например [9, 10], но решение задачи корректировки при использовании нескольких ЕНЭ не нашло должного отражения в литературе.

Целью настоящей работы является разработка метода определения параметров разрядной цепи существующих многоконтурных ВИИУ при изменении режима их эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используя теорию подобия [11], можно показать, что для параллельной работы *n* ЕНЭ на активно-индуктивную нагрузку имеют место следующие соотношения для масштабных коэффициентов при формировании геометрически подобных импульсов тока:

$$m_L = m_R \cdot m_t \quad (1)$$

$$m_U = m_R \cdot m_I \quad (2)$$

$$m_t = m_R \cdot m_C \quad (3)$$

$$m_J = m_I^2 \cdot m_t \quad (4)$$

$$m_Q = m_I \cdot m_t, \quad (5)$$

где m_R, m_L, m_C, m_t, m_U, m_I, m_J, m_Q – соответственно масштабные коэффициенты активного сопротивления, индуктивности, емкости, времени, зарядного напряжения, тока, интеграла действия и заряда.

Данные соотношения могут быть использованы для решения ряда задач модификации параметров ВИИУ.

Рассмотрим задачу перевода ВИИУ в режим эксплуатации с новой нагрузкой.

Задача 1. Пусть имеется ВИИУ, с помощью которого в нагрузке с параметрами $R_{\text{Н}}$, $L_{\text{Н}}$ формируется импульс тока с некоторыми АВП. Требуется в новой нагрузке с параметрами $R_{\text{Н}}^*$, $L_{\text{Н}}^*$ сформировать импульс тока с теми же АВП, что и в исходном режиме эксплуатации. Постановка задачи в таком виде дает основание принять $m_t = 1$ и $m_I = 1$, что позволяет сохранить АВП. Тогда, после подстановки m_t и m_I в (1) – (5), соотношение между остальными масштабными коэффициентами принимает следующий вид:

$$\begin{cases} m_L = m_R = m_U; \\ m_C \cdot m_U = 1; \; m_J = m_Q = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Изменение нагрузки характеризуется двумя величинами:

– коэффициентом изменения величины активного сопротивления нагрузки

$$m_R^* = \frac{R_{\text{Н}}^*}{R_{\text{Н}}} \quad (7)$$

– коэффициентом изменения величины индуктивности нагрузки

$$m_L^* = \frac{L_{\text{Н}}^*}{L_{\text{Н}}}. \quad (8)$$

Анализ первого уравнения системы (6) показывает, что изменение зарядных напряжений ЕНЭ должно производится в соответствии с большим значением одной из двух величин, определяемых по (7) и (8)

$$m^* = \text{MAX}\left(m_R^*, m_L^*\right), \quad (9)$$

где m^* – коэффициент изменения нагрузки; MAX () – функция, возвращающая большее значение из аргументов.

Тогда система (6) преобразуется к виду

$$\begin{cases} m_L = m_R = m_U = m^*; \\ m_C = \dfrac{1}{m^*}; \quad m_J = m_Q = 1. \end{cases} \quad (10)$$

Если коэффициент изменения величины активного сопротивления нагрузки больше коэффициента изменения величины индуктивности $m^* = m_R^* > m_L^*$, то в ветвь нагрузки (между точками a и b в схеме, показанной на рис. 1) должна быть введена дополнительная индуктивность (см. рис. 3а), величина которой равна

$$L_D = m^* \cdot L_{\text{Н}} - L_{\text{Н}}^* = m_R^* \cdot L_{\text{Н}} - L_{\text{Н}}^*. \quad (11)$$

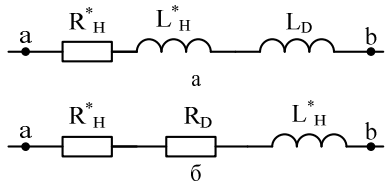

Рис. 3. Схемы корректировок нагрузки

Если коэффициент изменения величины активного сопротивления нагрузки меньше коэффициента изменения величины индуктивности $m^* = m_L^* > m_R^*$, то в ветвь нагрузки должно быть введено дополнительное сопротивление (см. рис. 3б), величина которого определяется по соотношению

$$R_D = m^* \cdot R_{\text{Н}} - R_{\text{Н}}^* = m_L^* \cdot R_{\text{Н}} - R_{\text{Н}}^*. \quad (12)$$

Соответственно при выполнении условия $m_L^* = m_R^*$ введение дополнительных элементов в ветвь нагрузки не требуется.

Таким образом, если имеется действующее ВИИУ, которое в нагрузке с параметрами $R_{\text{Н}}$, $L_{\text{Н}}$ формирует импульс тока с некоторым набором АВП, то при переходе в режим эксплуатации с нагрузкой, имеющей параметры $R_{\text{Н}}^*$ и $L_{\text{Н}}^*$, необходимо:

1. Определить вид и величину дополнительных элементов и ввести их в ветвь нагрузки в соответствии с (11) или (12);

2. Изменить в соответствии с (10) величины параметров элементов ЕНЭ следующим образом:

$$R_k^* = m^* \cdot R_k; \quad (13)$$

$$L_k^* = m^* \cdot L_k; \quad (14)$$

$$U_{Ck}^* = m^* \cdot U_{Ck}; \quad (15)$$

$$C_k^* = \frac{C_k}{m^*}, \quad (16)$$

где $k = 1 \ldots n$ – номер ЕНЭ.

При этом АВП импульса тока, формируемого в нагрузке, остаются прежними.

Рассмотрим задачу перевода ВИИУ в режим формирования нового импульса тока.

Задача 2. Пусть в нагрузке $R_{\text{Н}}$, $L_{\text{Н}}$ формируется импульс тока с характерным значением тока I и характерным временем T (например, как показано на рис. 2, максимальным значением тока и временем его достижения; амплитудой второй полуволны и периодом колебаний и т.п.).

Требуется сформировать в этой нагрузке геометрически подобный по форме импульс тока, который отличается от исходного величинами характерного времени T^* и характерного значения тока I^*.

Тогда коэффициент изменения характерного времени определится как

$$m_t^* = \frac{T^*}{T}, \qquad (17)$$

а коэффициент изменения характерного значения тока

$$m_I^* = \frac{I^*}{I}. \qquad (18)$$

Подставив m_t^* и m_I^* в (1) – (5) в качестве соответствующих масштабных коэффициентов, имеем:

$$\begin{cases} \dfrac{m_L}{m_R} = m_R \cdot m_C = m_t^*; \quad m_U = m_R \cdot m_I^*; \\ m_J = m_I^{*2} \cdot m_t^*; \quad m_Q = m_I^* \cdot m_t^*. \end{cases} \qquad (19)$$

В силу того, что активное сопротивление и индуктивность ветви нагрузки не могут быть уменьшены, должны выполняться следующие условия:

$$m_R \ge 1, \; m_L \ge 1. \qquad (20)$$

Положим, что $m_t^* \ge 1$, тогда из первого уравнения системы (19) с учетом (20) имеем:

$$m_L \ge m_R \ge 1, \qquad (21)$$

соответственно для варианта $m_t^* < 1$

$$m_R > m_L \ge 1. \qquad (22)$$

С точки зрения минимизации запасаемой в ВИИУ энергии, целесообразно для варианта $m_t^* \ge 1$ принять $m_R = 1$, а для $m_t^* < 1$ – $m_L = 1$. Тогда коэффициенты изменения параметров ЕНЭ, а также величины дополнительных элементов в ветви нагрузки могут быть определены по соотношениям, приведенным в табл. 1.

Если в качестве подобных величин выступают характерное время T и интеграл действия J (или заряд Q), то предварительно находим коэффициент изменения характерных значений тока, используя (4) (или (5)) $m_I^* = \left(\dfrac{m_J^*}{m_t^*}\right)^{0,5}$ (или $m_I^* = \dfrac{m_Q^*}{m_t^*}$) и решают далее задачу 2.

Таблица 1

$m_t^* \ge 1$	$m_t^* < 1$
$m_R^* = 1$	$m_R^* = \dfrac{1}{m_t^*}$
$m_L^* = m_t^*$	$m_L^* = 1$
$m_C^* = m_t^*$	$m_C^* = m_t^{*2}$
$m_U^* = m_I^*$	$m_U^* = \dfrac{m_I^*}{m_t^*}$
$L_D = \left(m_L^* - 1\right) \cdot L_{\text{Н}}$	$R_D = \left(m_R^* - 1\right) \cdot R_{\text{Н}}$

Таким образом, если имеется действующее ВИИУ, которое в нагрузке с параметрами $R_{\text{Н}}$, $L_{\text{Н}}$ формирует импульс тока с некоторым набором АВП – T и I, то при переходе в режим эксплуатации с другим набором АВП – T^* и I^*, необходимо:

1. Определить вид и величину дополнительных элементов и ввести их в ветвь нагрузки в соответствии с данными табл. 1;

2. Изменить в соответствии с (19) величины параметров элементов ЕНЭ следующим образом:

$$\begin{cases} R_k^* = m_R^* \cdot R_k; \quad L_k^* = m_L^* \cdot L_k; \\ U_{Ck}^* = m_U^* \cdot U_{Ck}; \quad C_k^* = m_C^* \cdot C_k, \end{cases} \qquad (23)$$

где $k = 1 \ldots n$ – номер ЕНЭ.

Можно показать, что, на основании геометрического подобия импульсов тока, после выполнения такой процедуры сохранятся отношения характерных параметров импульса тока и их разностей, например:

$$\frac{T_1^*}{T_2^*} = \frac{T_1}{T_2}; \qquad \frac{T_1^* - T_2^*}{T_3^* - T_4^*} = \frac{T_1 - T_2}{T_3 - T_4}; \qquad (24)$$

$$\frac{I_1^*}{I_2^*} = \frac{I_1}{I_2}; \qquad \frac{I_1^* - I_2^*}{I_3^* - I_4^*} = \frac{I_1 - I_2}{I_3 - I_4}. \qquad (25)$$

Рассмотрим задачу перевода ВИИУ в режим эксплуатации с новой нагрузкой и формой импульса.

Задача 3. Пусть в нагрузке $R_{\text{Н}}$, $L_{\text{Н}}$ формируется импульс тока с характерным значением тока I и характерным временем T.

Требуется сформировать в новой нагрузке с параметрами R_H^*, L_H^* геометрически подобный по форме импульс тока, который отличается от исходного величинами характерного времени T^* и характерного значения тока I^*.

Решение поставленной задачи решается путем последовательного решения двух, ранее рассмотренных задач:

– изменить нагрузку при сохранении АВП импульса тока;

– изменить АВП импульса тока, сохранив полученные значения нагрузки.

Отметим особенность решения второй задачи – в качестве нагрузки следует принять все элементы ветви нагрузки, полученные из решения первой задачи.

Применение полученных решений покажем на следующем примере.

В исходном режиме генератор А-компоненты тока искусственной молнии [3], выполненный по схеме, приведенной на рис. 1 и имеющий два ЕНЭ с параметрами R_1 = 0,076 Ом; L_1 = $2 \cdot 10^{-6}$ Гн; C_1 = $228 \cdot 10^{-6}$ Ф; U_{C1} = $35 \cdot 10^3$ В; R_2 = 0,18 Ом; L_2 = $1,5 \cdot 10^{-6}$ Гн; C_2 = $108 \cdot 10^{-6}$ Ф; U_{C2} = $35 \cdot 10^3$ В работает на RL – нагрузку с параметрами $R_{\text{Н}}$ = 0,05 Ом; $L_{\text{Н}}$ = $1 \cdot 10^{-6}$ Гн. Формируемый импульс тока имеет следующий АВП: $I_{\max}$ = $2,05 \cdot 10^5$ А; $t_{\max}$ = $2,9 \cdot 10^{-5}$ с.

Требуется, используя действующую установку, в новой нагрузке с параметрами $R_{\text{Н}}$ = 0,1 Ом; $L_{\text{Н}}$ = $3 \cdot 10^{-6}$ Гн сформировать импульс тока с следующими АВП: $I_{\max}$ = $5 \cdot 10^4$ А; $t_{\max}$ = $2 \cdot 10^{-5}$ с.

Производя последовательно решение рассмотренных в статье задач с заданными исходными данными, приходим к необходимости следующей модификации параметров ЕНЭ: R_1 = 0,331 Ом; L_1 = $6 \cdot 10^{-6}$ Гн; C_1 = $0,361 \cdot 10^{-6}$ Ф; U_{C1} = $37,1 \cdot 10^3$ В; R_2 = 0,783 Ом; L_2 = $4,5 \cdot 10^{-6}$ Гн; C_2 = $0,171 \cdot 10^{-6}$ Ф;

U_{C2} = 37,1·10^3 В. При этом требуется в цепь нагрузки ввести дополнительный резистор R_D = 0,118 Ом.

Учитывая, что максимальное напряжение зарядки ЕНЭ равно 50 кВ [3], предлагаемая модификация параметров ЕНЭ может быть осуществлена отключением части накопительных конденсаторов и введением, при необходимости, в цепи их разрядки дополнительных резисторов и катушек индуктивности.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод модификации параметров многоконтурных испытательных устройств при их переводе в новый режим эксплуатации.

2. Получены соотношения для определения величины дополнительных элементов, вводимых в цепь *RL*-нагрузки для сохранения контролируемых амплитудно-временных параметров импульса тока.

Материалы статьи могут быть использованы для разработки методов модификации испытательных устройств других типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплекс высоковольтного испытательного электрофизического оборудования экспериментальной базы НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" / М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, А.К. Колобовский, В.И. Кравченко // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ "ХПИ". - №4. – 2004. – С. 3 – 13.
2. Мощные генераторы импульсных напряжений и токов предельных параметров для тестирования силового электроэнергетического оборудования / М.И. Баранов, В.А. Бочаров, Н.Н. Игнатенко, А.К. Колобовский // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – №2. – С. 75 – 80.
3. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов / М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, В.И. Кравченко [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2008. - №3. – С. 81 – 85.
4. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник / В.И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
5. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
6. Губарев Г.Г. Трехкритериальная оптимизация импульсных источников питания / Г.Г. Губарев, В.В. Конотоп // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. - №6. – С. 66 – 73.
7. Петков А.А. Разряд двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПІ". – №34. – 2007. – С. 79 – 85.
8. Фридман Б.Э. Формирование импульса тока при программируемом разряде емкостного накопителя энергии / Б.Э. Фридман // Электричество. – 1999. – №6. – С. 42 – 48.
9. 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.
10. Кравченко В.И. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии / В.И. Кравченко, А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 70–75.
11. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / В.А. Веников, Г.В. Веников. – М.: Высш. школа, 1984. – 439 с.

Поступила 01.07.2009

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

A.A. Petkov

Test devices parameters modification of under their switching to a new operation mode.

In the article, a parameter modification method for multiloop test devices under their switching to a new operation mode is introduced. The method applicability for test devices with an active-reactive load is shown.

Key words – **multiloop test device, active-reactive load, operation mode switching, parameters modification**