

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.

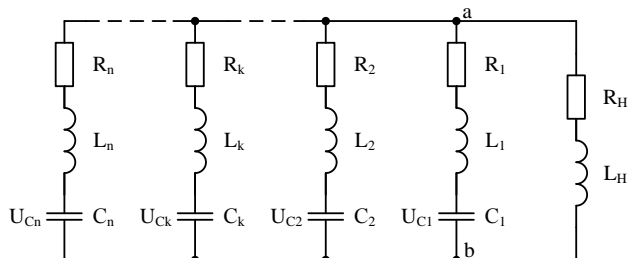


Рис. 1. Эквивалентная схема испытательного устройства

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].

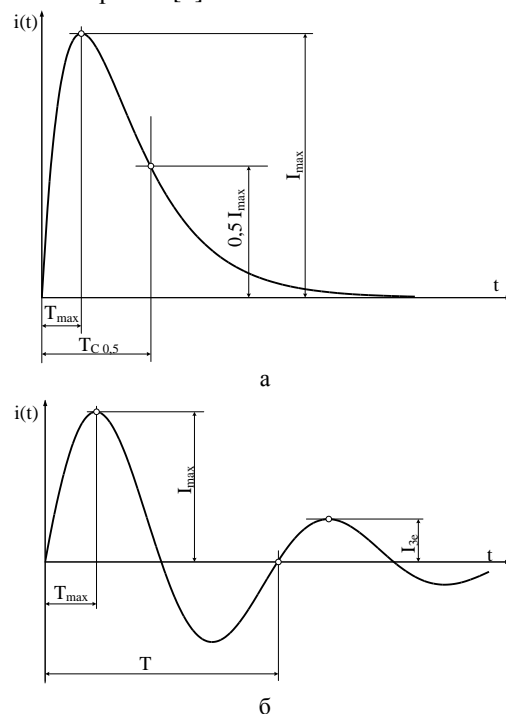


Рис. 2. Типовые формы испытательных импульсов тока и их АВП

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

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_H , L_H формируется импульс тока с некоторыми АВП. Требуется в новой нагрузке с параметрами R_H^* , L_H^* 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

$$m_R^* = \frac{R_H^*}{R_H} \quad (7)$$

– коэффициентом изменения величины индуктивности нагрузки

$$m_L^* = \frac{L_H^*}{L_H}. \quad (8)$$

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

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

где m^* – коэффициент изменения нагрузки; $\text{MAX}(\cdot)$ – функция, возвращающая большее значение из аргументов.

Тогда система (6) преобразуется к виду

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

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

$$L_D = m^* \cdot L_H - L_H^* = m_R^* \cdot L_H - L_H^*. \quad (11)$$

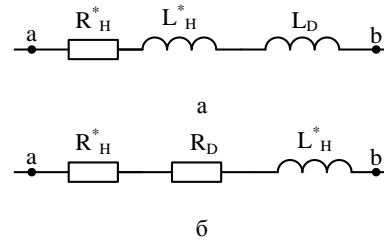


Рис. 3. Схемы корректировок нагрузки

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

$$R_D = m^* \cdot R_H - R_H^* = m_L^* \cdot R_H - R_H^*. \quad (12)$$

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_H , L_H формирует импульс тока с некоторым набором АВП, то при переходе в режим эксплуатации с нагрузкой, имеющей параметры R_H^* и L_H^* , 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 $k = 1 \dots n$ – 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_H, L_H 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

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

а коэффициент изменения характерного значения тока

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

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

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

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

$$m_R \geq 1, \quad m_L \geq 1. \quad (20)$$

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

$$m_L \geq m_R \geq 1, \quad (21)$$

соответственно для варианта $m_t^* < 1$

$$m_R > m_L \geq 1. \quad (22)$$

С точки зрения минимизации запасаемой в ВИИУ энергии, целесообразно для варианта $m_t^* \geq 1$ 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,

$$\text{используя (4) (или (5)) } m_I^* = \left(\frac{m_J}{m_t^*} \right)^{0,5} \quad (\text{или } m_I^* = \frac{m_Q}{m_t^*})$$

и решают далее задачу 2.

Таблица 1

$m_t^* \geq 1$	$m_t^* < 1$
$m_R^* = 1$	$m_R^* = \frac{1}{m_t^*}$
$m_L^* = m_t^*$	$m_L^* = 1$
$m_C^* = m_t^*$	$m_C^* = m_t^{*2}$
$m_U^* = m_I^*$	$m_U^* = \frac{m_I^*}{m_t^*}$
$L_D = (m_L^* - 1) \cdot L_H$	$R_D = (m_R^* - 1) \cdot R_H$

Таким образом, если имеется действующее ВИИУ, которое в нагрузке с параметрами R_H, L_H 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:

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

где $k = 1 \dots n$ – номер ЕНЭ.

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

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

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

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

Задача 3. Пусть в нагрузке R_H, L_H 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 $R_1 = 0,076 \text{ Ом}$; $L_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; $C_1 = 228 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$; $U_{C1} = 35 \cdot 10^3 \text{ В}$; $R_2 = 0,18 \text{ Ом}$; $L_2 = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; $C_2 = 108 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$; $U_{C2} = 35 \cdot 10^3 \text{ В}$ работает на RL – нагрузку с параметрами $R_H = 0,05 \text{ Ом}$; $L_H = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$. Формируемый импульс тока имеет следующий АВП: $I_{\max} = 2,05 \cdot 10^5 \text{ А}$; $t_{\max} = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.

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

Производя последовательно решение рассмотренных в статье задач с заданными исходными данными, приходим к необходимости следующей модификации параметров ЕНЭ: $R_1 = 0,331 \text{ Ом}$; $L_1 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; $C_1 = 0,361 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$; $U_{C1} = 37,1 \cdot 10^3 \text{ В}$; $R_2 = 0,783 \text{ Ом}$; $L_2 = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$; $C_2 = 0,171 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$; $U_{C2} = 37,1 \cdot 10^3 \text{ В}$. При этом требуется в цепь нагрузки ввести дополнительный резистор $R_D = 0,118 \text{ Ом}$.

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.

ЛИТЕРАТУРА

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 // Электротехника і електромеханіка. – 2003. – №2. – С. 75 – 80.

3. Генератор тока искусственной молнии для натуральных 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 "ХПИ". – №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 // Электротехніка 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 А.А., 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