

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

ПРОГРАММИРУЕМЫЙ РАЗРЯД ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА НЕЛИНЕЙНУЮ НАГРУЗКУ

У роботі запропонована методика аналітичного розрахунку програмованого розряду подібних емисних накопичувачів енергії на параметричне навантаження з використанням східчастої апроксимації його часової залежності. Показано задовільний збіг результатів аналітичного й чисельного рішень.

The technique of analytical calculation of the programmed discharge of similar energy capacitor stores on parametrical loading with use of step approximation of its time dependence is offered in the work. Satisfactory correlation of results of the analytical and numerical solutions is shown.

В работе предложена методика аналитического расчета программируемого разряда подобных емкостных накопителей энергии на параметрическую нагрузку с использованием ступенчатой аппроксимации его временной зависимости. Показано удовлетворительное совпадение результатов аналитического и численного решений.

Постановка проблемы. При испытаниях различного электротехнического и электронного оборудования, на стойкость к воздействию электромагнитных факторов естественного и искусственного происхождения, широко используются генераторы импульсов тока на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Многообразии областей применения испытательных импульсов тока обуславливает широкую вариацию их амплитудно-временных параметров, что в свою очередь требует разработки и создания соответствующего испытательного оборудования.

Формирование испытательных импульсов тока с широкой гаммой амплитудно-временных параметров при использовании одного ЕНЭ в экономически оправданных рамках достаточно проблематично и, как показывает опыт, в крупных испытательных центрах имеется несколько ЕНЭ с различным напряжением зарядки и различной запасаемой энергией. Возможности испытательных комплексов существенно расширяются при использовании параллельного разряда нескольких ЕНЭ на общую нагрузку. При этом разряд ЕНЭ может осуществляться одновременно (постоянная структура разрядной цепи) или со сдвигом во времени (переменная структура разрядной цепи). Разряд со сдвигом во времени имеет больше возможностей для формирования различных импульсов. Однако для проектирования испытательных устройств такого класса требуется разработка специальных методов их расчета.

Анализ публикаций. Исторически первыми устройствами с изменяемой в процессе разряда структурой являются генераторы импульсов напряжения со срезающим разрядником. С их помощью формируются испытательные импульсы напряжения, воздействующие на изоляцию оборудования,

снабженного защитными элементами [1].

Вторым типом устройств с переменной структурой разрядной цепи являются генераторы импульсов тока с замыкателями нагрузки, получившие широкое распространение, как в области испытаний, так и при проведении физических исследований [2, 3]. Использование замыкателей позволяет корректировать форму импульса тока в нагрузке.

В последнее время были проведены исследования параллельного разряда нескольких ЕНЭ на одну нагрузку со сдвигом во времени (программируемая коммутация ЕНЭ) [4-8].

Управление структурой разрядной цепи может производиться в зависимости от времени протекания импульса тока (воздействия импульса напряжения) и в зависимости от его характерных значений (например, в момент достижения максимального значения).

Накопленный теоретический материал позволяет в настоящее время все высоковольтные импульсные устройства с переменной структурой разрядной цепи рассматривать как устройства с программируемой коммутацией.

В известных работах по программируемой коммутации ЕНЭ расчеты базируются на специально разработанных [6-8] и планируемых к разработке [4, 5] приближенных численных методах. Имеются также ограничения на параметры элементов ЕНЭ и напряжение их зарядки [6-8].

Работы [9-10] являются дальнейшим развитием идеи предложенных в [6] и переводят решение задачи из плоскости использования численных приближенных методов в плоскость аналитического решения. Одновременно снимаются ограничения на значения напряжения зарядки ЕНЭ, и ослабляется требование к параметрам подключаемых ЕНЭ. Однако в данных работах рассматривается программируемый разряд на линейную нагрузку.

Целью настоящей работы является разработка методики аналитического расчета программируемого разряда подобных емкостных накопителей энергии на нелинейную нагрузку.

Материалы и результаты исследований. Рассмотрим n ЕНЭ, которые могут подключаться через индивидуальные коммутаторы на общую нагрузку, как показано на рис. 1. Пусть все ЕНЭ подобны, то есть для их параметров выполняются следующие условия:

$$\frac{R_n}{R_j} = \frac{L_n}{L_j} = \frac{C_j}{C_n}, \quad (1)$$

где R_n, L_n, C_n – параметры n -го ЕНЭ; R_j, L_j, C_j – параметры j -го ЕНЭ.

Соотношение (1) имеет место в случае, если каждый k -ый ЕНЭ состоит из m_k одинаковых модулей с параметрами R', L', C' и его параметры соответственно равны:

$$R_k = \frac{R'}{m_k}; \quad L_k = \frac{L'}{m_k}; \quad C_k = m_k C', \quad (2)$$

где $k = 1 \dots n$.

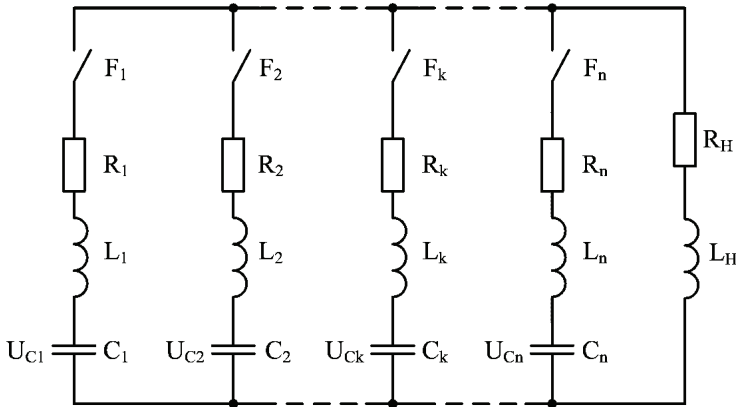


Рисунок 1 – Схема включения ЕНЭ: $R_1 \dots R_n, L_1 \dots L_n, C_1 \dots C_n, U_{C1} \dots U_{Cn}$ – соответственно активное сопротивление, индуктивность, емкость и напряжение зарядки ЕНЭ; R_H, L_H – соответственно активное сопротивление и индуктивность нагрузки; $F_1 \dots F_n$ – коммутаторы

В общем случае напряжения зарядки ЕНЭ имеют различные значения $U_{C1} \neq U_{C2} \neq \dots \neq U_{Ck} \neq \dots \neq U_{Cn}$. Каждый из коммутаторов $F_1 \dots F_n$ включается в соответствующий момент времени $T_1 \dots T_n$, причем $T_1 = 0$ и $T_k \leq T_j$ для $k < j$.

В дальнейшем будем использовать две системы амплитудно-временных координат. В первой началом отсчета времени является момент включения первого ЕНЭ, и время обозначим T . Во второй системе – время отсчитывается от момента включения k -го ЕНЭ T_k и обозначим $t = T - T_k$.

В [9] показано, что переходный процесс в схеме, показанной на рис. 1, при последовательном включении ЕНЭ может быть аналитически описан с помощью рекуррентных соотношений, получаемых из решения двух вспомогательных задач.

Результатом решения первой задачи является аналитическое описание переходного процесса при ненулевых начальных условиях в схеме, показанной на рис. 2.

Для данной схемы по второму закону Кирхгофа в операторной форме имеем

$$I_{e,k}(p) Z(p) = -\frac{U_{Ce,k}(T_k)}{p} + (L_{e,k} + L_H) i_{e,k}(T_k). \quad (3)$$

Операторное сопротивление цепи имеет вид

$$Z(p) = pL_e + R_e + \frac{1}{pC_{e,k}}, \quad (4)$$

где $L_e = L_{e,k} + L_H$; $R_e = R_{e,k} + R_H$.

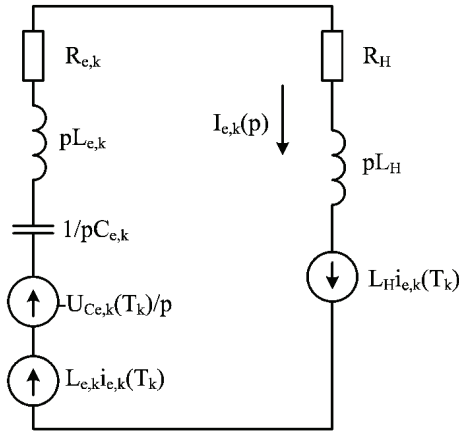


Рисунок 2 – Эквивалентная послекоммутационная схема:

$R_{e,k}$, $L_{e,k}$, $C_{e,k}$ – соответственно эквивалентные активное сопротивление, индуктивность и емкость ветви эквивалентного ЕНЭ; $U_{e,k}(T_k)$, $i_{e,k}(T_k)$ – соответственно напряжение зарядки эквивалентного ЕНЭ и ток в цепи в момент коммутации T_k

В зависимости от соотношения параметров элементов схемы в разрядной цепи может протекать импульс тока различной формы, который во временной области для $t \geq T - T_k$ может быть представлен в виде

$$i_{e,k}(t) = i'_{e,k}(t) + i''_{e,k}(t), \quad (5)$$

где $i'_{e,k}(t)$ – составляющая полного тока, определяемая наличием в начальный момент напряжения $U_{e,k}(T_k)$ на эквивалентной емкости $C_{e,k}$; $i''_{e,k}(t)$ – составляющая полного тока, определяемая наличием в начальный момент тока $i_{e,k}(T_k)$ в индуктивностях эквивалентной схемы $L_{e,k}$ и L_H .

Напряжение на емкости $C_{e,k}$ может быть представлено в виде:

$$u_{C_{e,k}}(t) = U_{C_{e,k}}(T_k) + u'_{C_{e,k}}(t) + u''_{C_{e,k}}(t), \quad (6)$$

где $u'_{C_{e,k}}(t)$ – составляющая напряжения, связанная с наличием в начальный момент напряжения $U_{C_{e,k}}(T_k)$ на эквивалентной емкости $C_{e,k}$; $u''_{C_{e,k}}(t)$ – составляющая напряжения, связанная с наличием в начальный момент тока $i_{e,k}(T_k)$ в индуктивностях эквивалентной схемы $L_{e,k}$ и L_H .

Результатом решения второй задачи является преобразование схемы, показанной на рис. 3 к схеме, показанной на рис. 2.

Преобразование осуществляется с использованием теоремы Миллмана [11] при условии подобия ЕНЭ. При этом имеют место следующие соотношения для ее параметров:

$$R_{e,k} = \frac{R'}{\sum_{j=1}^k m_j}; \quad L_{e,k} = \frac{L'}{\sum_{j=1}^k m_j}; \quad C_{e,k} = C' \sum_{j=1}^k m_j, \quad (7)$$

где R', L', C' – параметры модулей; m_j – количество модулей в j -ом ЕНЭ.

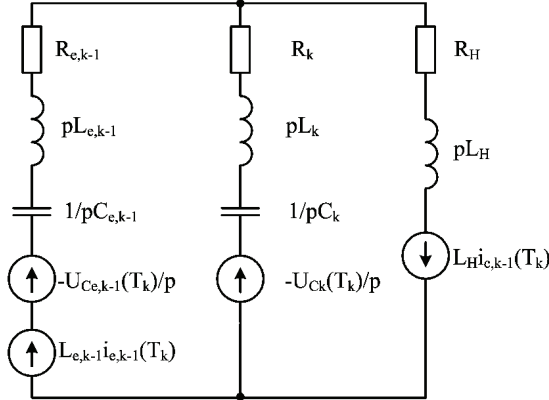


Рисунок 3 – Послекоммутационная схема двух ЕНЭ:

$R_{e,k-1}, L_{e,k-1}, C_{e,k-1}$ – соответственно эквивалентные активное сопротивление, индуктивность и емкость ветви $k-1$ – го эквивалентного ЕНЭ;

$U_{e,k-1}(T_k), i_{e,k-1}(T_k)$ – соответственно напряжение зарядки $k-1$ – го эквивалентного ЕНЭ и ток в цепи в момент коммутации T_k ; $R_k, L_k, C_k, U_{Ck}(T_k)$ – соответственно активное сопротивление, индуктивность, емкость и напряжение зарядки подключаемого k – го ЕНЭ

Напряжения и токи в момент коммутации рассчитываются по рекуррентным соотношениям:

$$U_{Ce,k}(T_k) = \frac{U_{Ce,k-1}(T_k) \sum_{j=1}^{k-1} m_j + U_{Ck}(T_k) m_k}{\sum_{j=1}^k m_j}; \quad (8)$$

$$i_{e,k}(T_k) = i_{e,k-1}(T_k), \quad (9)$$

где $U_{Ck}(T_k)$ – напряжение зарядки подключаемого k -го ЕНЭ в момент T_k , а начальные значения напряжения эквивалентного ЕНЭ и ток в его ветви и на грузке имеют вид $U_{Ce,1}(T_1) = U_{C1}(T_1), i_{e,1}(T_1) = 0$.

Рассмотренные выше решения двух вспомогательных задач позволяют получить аналитическое решение задачи программируемого подключения n подобных ЕНЭ.

Пусть в момент времени $T = T_1 = 0$ к нагрузке подключается первый

ЕНЭ. Тогда ток в нагрузке в интервале времени до подключения второго ЕНЭ $[T_1, T_2]$ можно найти из решения первой задачи (см. рис. 2) при условии, что $R_{e,k} = R_{e,1} = R_1$, $L_{e,k} = L_{e,1} = L_1$, $C_{e,k} = C_{e,1} = C_1$, $i_{e,k}(T_k) = i_{e,1}(T_1) = 0$, $U_{Ce,k}(T_k) = U_{Ce,1}(T_1) = U_{C1}(T_1)$.

В момент времени $T = T_2$ подключается второй ЕНЭ и эквивалентная схема разрядной цепи принимает вид, показанный на рис. 3. Далее, осуществляя эквивалентные преобразования, перейдем к схеме, показанной на рис. 2, предварительно рассчитав параметры эквивалентного ЕНЭ по соотношениям (7)

$$R_{e,2} = \frac{R'}{m_1 + m_2}; \quad L_{e,2} = \frac{L'}{m_1 + m_2}; \quad C_{e,2} = C'(m_1 + m_2);$$

$$U_{Ce,2}(t_2) = \frac{U_{Ce,1}(T_2)m_1 + U_{C2}(T_2)m_2}{m_1 + m_2}; \quad i_{e,2}(T_2) = i_{e,1}(T_2),$$

где $i_{e,1}(T_2)$ и $U_{Ce,1}(T_2)$ – соответственно ток в цепи и напряжение на первом конденсаторе в момент T_{2-0} , то есть до момента коммутации (подключения второго ЕНЭ), которые определяются из решения первой задачи по соотношениям (5) и (6); R', L', C' – параметры модулей; m_1 и m_2 – количество модулей в 1-ом и 2-ом ЕНЭ.

Продолжая процесс расчета подобным образом, мы можем последовательно рассчитать изменение тока в нагрузке для каждого из интервалов $[T_1 = 0, T_2], [T_2, T_3], \dots, [T_{k-1}, T_k], \dots, [T_n, \infty)$.

Рассмотренная выше линейная RL -нагрузка представляет широкую гамму реальных объектов, однако не исчерпывает все множество вариантов, встречающихся на практике, например в качестве нагрузки ЕНЭ могут выступать элементы с различным типом нелинейности, в частности, параметрические элементы, у которых значения параметров зависят от времени [12], то есть исходя из (4) имеем

$$L_e = L_{e,k} + L_H(T); \quad R_e = R_{e,k} + R_H(T). \quad (10)$$

Если значения параметров нагрузки изменяются скачком в момент коммутации k -го ЕНЭ и далее остаются постоянными до момента коммутации $k + 1$ -го ЕНЭ, то в межкоммутационном интервале времени $[T_k, T_{k+1}]$ параметры импульса тока могут быть определены по (5) и (6) с учетом изменившихся значений параметров нагрузки.

На рис. 4 приведены результаты расчетов программированного разряда 4-х ЕНЭ на параметрическую нагрузку. Параметры ЕНЭ при расчете составляли: напряжение зарядки $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = 1 \cdot 10^4$ В; емкость $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 2,5 \cdot 10^{-6}$ Ф; индуктивность $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 4 \cdot 10^{-6}$ Гн; активное сопротивление $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0,8$ Ом. Индуктивность нагрузки $L_H = 9 \cdot 10^{-6}$ Гн. Для сопротивления нагрузки, представленной в виде ступенчатой кривой 1, с использованием материалов [10] был определен режим формирования импульса тока с квазипостоянной вершиной (кривая 2). В

этом режиме времена коммутации ЕНЭ составили $T_1 = 0$; $T_2 = 1,36 \cdot 10^{-5}$ с; $T_3 = 2,67 \cdot 10^{-5}$ с; $T_4 = 3,72 \cdot 10^{-5}$ с.

Для проверки возможности применения ступенчатого представления непрерывно изменяющейся во времени нагрузки при расчете программируемого разряда ЕНЭ, было проведено схемотехническое моделирование программируемого разряда указанных выше 4-х ЕНЭ с использованием программной среды Micro-Cap (кривая 4). Для этого ступенчатая кривая 1 была аппроксимирована зависимостью вида

$$R_H = 5,78 \cdot 10^{13} T^3 - 2,07 \cdot 10^9 T^2 - 4,59 \cdot 10^4 T + 2,1894, \quad (11)$$

график которой представлен на рис. 4 пунктирной кривой 3.

Как видно из сопоставления кривых 2 и 4, формы импульсов тока достаточно близки, что подтверждает возможность использования полученных соотношений для расчетов программируемого разряда ЕНЭ на параметрическую нагрузку. Причем с увеличением количества подключаемых ЕНЭ (а значит, и увеличением количества аппроксимирующих ступеней) точность расчетов увеличивается.

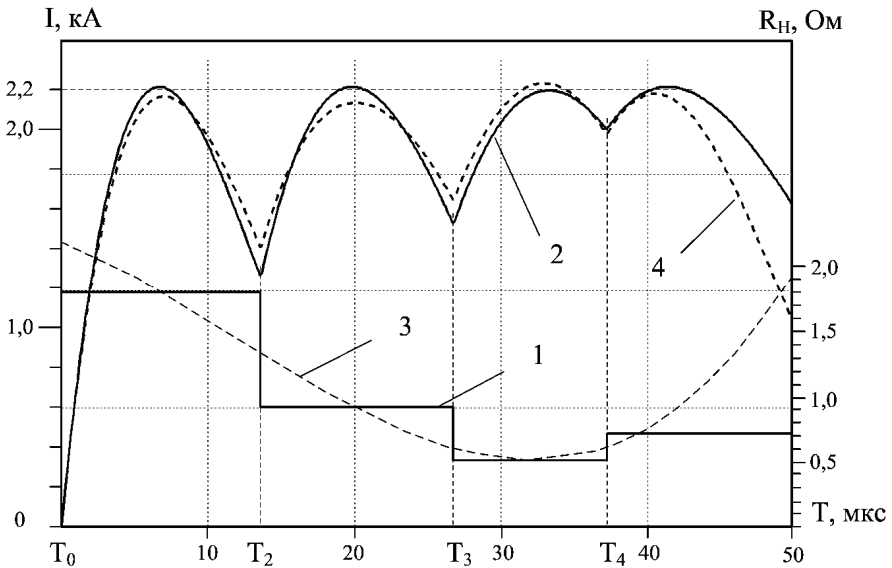


Рисунок 4 – Изменение сопротивления нагрузки и тока в процессе разряда

Выводы

1. Предложена методика аналитического расчета программированного разряда подобных емкостных накопителей энергии на параметрическую нагрузку с использованием ступенчатой аппроксимации ее временной зависимости. Показано удовлетворительное совпадение результатов аналитического и численного решения.

2. Результаты расчетов, проведенных по предложенной методике при ступенчатой аппроксимации временной зависимости активного сопротивления нагрузки, показали удовлетворительное совпадение с результатами схемотехнического моделирования.

Приведенные материалы могут служить базой для разработки методики синтеза программы коммутации подобных емкостных накопителей энергии на нелинейную нагрузку.

Список источников информации: 1. *Смирнов С. М.* Генераторы импульсов высокого напряжения : монография / *С. М. Смирнов, П. В. Терентьев.* – М.-Л.: Энергия, 1964. – 240 с. 2. *Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц, В.С. Комельков и др.; под ред. В.С. Комелькова.* – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 3. *Баранов М.И.* Применение мощных генераторов импульсных напряжений в схеме с замыкателем нагрузки для получения больших импульсных токов молнии / *М.И. Баранов, Н.Н. Игнатенко, А.К. Колобовский* // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Электроэнергетика и преобразовательная техника». – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – № 4. – С. 37-45. 4. *Блащенко А.Д.* Подход к синтезу емкостного электроразрядного источника энергии для разрядноимпульсных технологий / *А.Д. Блащенко, Н.Д. Дивак* // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах : междунар. науч. конф., 17-21 августа 2009 г. : тезисы докл. / Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. – Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. – С. 151-153. 5. *Блащенко А.Д.* Подход к синтезу многоконтурного электроразрядного источника энергии для разрядноимпульсных технологий / *А.Д. Блащенко, Н.Д. Дивак* // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах : междунар. науч. конф., 17-21 августа 2009 г. : тезисы докл. / Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. – Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. – С. 149-150. 6. *Фридман Б.Э.* Переходные процессы при программируемом разряде емкостного накопителя энергии / *Б.Э. Фридман* // Электричество. – 1989. – № 12. – С. 36-41. 7. *Емелин П.Ю.* Исследование программируемого разряда емкостного накопителя энергии / *П.Ю. Емелин, Ф.Г. Рутберг, Б.Э. Фридман* // Известия академии наук. Энергетика. – 1994. – № 3. – С. 41-49. 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.* Переходные процессы при программируемой коммутации подобных емкостных накопителей энергии / *А.А. Петков* // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 4. – С. 60-64. 10. *Петков А.А.* Формирование испытательных импульсов тока при программируемом разряде подобных емкостных накопителей энергии / *А.А. Петков* // Технічна електродинаміка. – 2010. – Ч. 3, тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – С. 161-164. 11. *Конторович М.И.* Операционное исчисление и процессы в электрических цепях / *М.И. Конторович.* – М.: Сов. радио, 1975. – 320 с. 12. *Филиппов Е.* Нелинейная электротехника / *Е. Филиппов* : пер. с нем. – М.: Энергия, 1976. – 496 с.

Поступила в редколлегию 14.03.2012.