

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРОГРАММИРУЕМОЙ КОММУТАЦИИ ПОДОБНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

*У роботі отримані аналітичні вирази для опису імпульсу струму в навантаженні при програмувальній комутації подібних ємнісних накопичувачів енергії. Показано можливість регулювання форми імпульсу струму зміною програми комутації та напруги зарядки накопичувачів.*

*В работе получены аналитические выражения для описания импульса тока в нагрузке при программируемой коммутации подобных емкостных накопителей энергии. Показана возможность регулирования формы импульса тока изменением программы коммутации и напряжения зарядки накопителей.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** При испытаниях различного электротехнического и электронного оборудования, на стойкость к воздействию электромагнитных факторов естественного и искусственного происхождения, широко используются генераторы импульсов тока, создаваемые на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Создаваемые ими импульсы тока используются либо непосредственно, как воздействующий фактор (например, при исследовании электродинамической и электротермической устойчивости оборудования), либо в качестве фактора, порождающего другие испытательные воздействия (например, импульсное магнитное поле, световой импульс). Такое многообразие областей применения испытательных импульсов тока обуславливает широкую вариацию их амплитудно-временных параметров (АПВ), что в свою очередь требует разработки и создания с соответствующего испытательного оборудования.

Формирование импульсов тока с широкой гаммой АВП при использовании одного ЕНЭ достаточно проблематично и, как показывает опыт, в крупных испытательных центрах имеется несколько ЕНЭ с различным напряжением зарядки и различной запасаемой энергией. Возможности испытательной базы можно существенно расширить за счет параллельного разряда нескольких ЕНЭ на общую нагрузку. Однако для проектирования испытательных устройств такого класса требуется разработка специальных методов их расчета.

**Анализ публикаций.** Различные вопросы одно-временной работы нескольких ЕНЭ на общую нагрузку были исследованы в ряде работ, например [1 – 5].

В [1] приведены результаты численного и экспериментального исследования переходного процесса при параллельной работе двух генераторов импульсных напряжений на активно-индуктивную нагрузку с целью формирования импульса тока молнии.

В [2] представлены системы операторных уравнений, описывающих переходный процесс при работе генераторов больших импульсных токов с корректирующей цепью на  $RL$ -нагрузку. Как показано в работе, было установлено, что применение в разрядных цепях генераторов больших импульсных токов с мощными ЕНЭ корректирующих низкоомных и низкоиндуктивных  $RLC$ -цепей, включенных параллельно активно-индуктивной нагрузке, позволяет обеспечить увеличение амплитудных значений разрядного тока в  $RL$ -нагрузке. Включенные корректирующие цепи в данном случае можно рассматривать как ЕНЭ с нулевым напряжением зарядки.

В [3] показано, что при одновременном разряде двух ЕНЭ на  $RL$ -нагрузку в зависимости от соотношения параметров схемы возможно формирование пяти характерных видов импульса тока в нагрузке. Получены аналитические выражения для определения границ области соотношения параметров схемы, в которой в нагрузке формируется униполярный импульс тока с монотонным нарастанием и спадом его значений.

В [4, 5] рассмотрено решение задачи выбора параметров элементов импульсных источников питания, работающих на общую нагрузку, как задачи оптимизации по различным критериям. В [5] также показано, что применение схем с параллельной работой емкостных накопителей энергии после проведения трехкритериальной оптимизации позволяет уменьшить суммарную энергоемкость импульсных источников в десятки раз. Отмечено, что уменьшение энергоемкости особенно эффективно в случае, когда длительность спада превышает в сто и более раз длительность фронта.

Расширение возможностей генераторов импульсов тока по формированию импульсов с различными АВП за счет одновременного включения ЕНЭ рассмотрено в работах [6 – 8].

В [6] был предложен программируемый режим разряда ЕНЭ, состоящего из  $n$  модулей. Все модули представляли собой последовательные  $RLC$  цепочки с одинаковыми значениями емкости –  $C$ , индуктивности –  $L$ , активного сопротивления –  $R$  и напряжения зарядки емкости –  $U$ . Сущность программируемого режима состояла в неодновременном управляемом подключении каждого модуля к  $RL$  – нагрузке через отдельный коммутатор. Для исследования переходного процесса при программируемой коммутации был предложен приближенный метод, основанный на отдельном рассмотрении "медленных" и "быстрых" процессов в схеме. При исследовании "медленного" процесса, определявшего протекание тока в нагрузке, пренебрегалось  $R$  и  $L$  параметрами модуля. Анализ "быстрого" процесса, определявшего перераспределение заряда в схеме при подключении очередного модуля, пренебрегалось изменением напряжения на нагрузке при коммутационном процессе. В конечном итоге ток в нагрузке приближенно определялся в виде решения конечно-разностных или дифференциальных уравнений второго порядка, учитывающих параметры электрических цепей ЕНЭ и темп подключения заряженных модулей (промежутке времени между включениями модулей).

В работе [7], на базе разработанной в [6] методики приближенного анализа, было проведено исследование программируемого разряда ЕНЭ на  $RL$  – на-

грузку, рельсотрон и электрическую дугу. Основное внимание в работе было уделено исследованию процесса формирования импульса тока трапецидальной формы.

Работа [8] посвящена синтезу программы включения модулей ЕНЭ, обеспечивающей формирование заданной формы импульса тока при минимальной запасаемой энергии в конденсаторной батарее ЕНЭ.

Как видно из анализа, имеются работы, в которых исследовано формирование импульса тока при одновременном разряде нескольких ЕНЭ с различной запасаемой энергией и различным напряжением зарядки, и работы, в которых рассматривается программированный разряд идентичных ЕНЭ на общую нагрузку. Логичным продолжением исследований в данном направлении является изучение переходных процессов при программируемой коммутации различных ЕНЭ на общую нагрузку.

**Целью** настоящей работы является вывод аналитических соотношений, обеспечивающих расчет импульса тока в активно-индуктивной нагрузке при программируемом режиме разряда подобных емкостных накопителей энергии.

#### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа переходных процессов ЕНЭ может быть представлен последовательной  $RLC$  – цепью. Подобными будем называть такие ЕНЭ, для которых 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:

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

где  $k = 1 \dots n$ .

Рассмотрим схему включения  $n$  подобных ЕНЭ на  $RL$  – нагрузку, показанную на рис. 1.

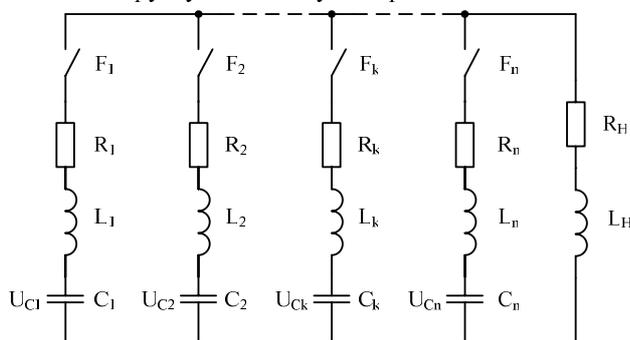


Рис. 1. Схема включения ЕНЭ

На рис. 1 обозначено:  $R_1 \dots R_n, L_1 \dots L_n, C_1 \dots C_n, UC_1 \dots UC_n$  – 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  $UC_1 \neq UC_2 \neq \dots \neq UC_k \neq \dots \neq UC_n$ . 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  $k < j$ .

Рассмотрим задачу аналитического описания импульса тока формируемого в нагрузке. Для расчета переходных процессов в схеме, показанной на рис. 1, рассмотрим решение двух вспомогательных задач.

**Задача 1.** Пусть в момент времени  $t_k$  произведена коммутация и операторная послекоммутационная схема имеет вид, показанный на рис. 2.

Для данной схемы по второму закону Кирхгофа в операторной форме имеем

$$I_{e,k}(p) \cdot Z^*(p) = -\frac{UC_{e,k}(t_k)}{p} + (L_{e,k} + L_H) \cdot i_{e,k}(t_k). \quad (3)$$

Операторное сопротивление цепи имеет вид

$$Z^*(p) = p \cdot L^* + R^* + \frac{1}{p \cdot C_{e,k}}, \quad (4)$$

где  $L^* = L_{e,k} + L_H$ ;  $R^* = R_{e,k} + R_H$ .

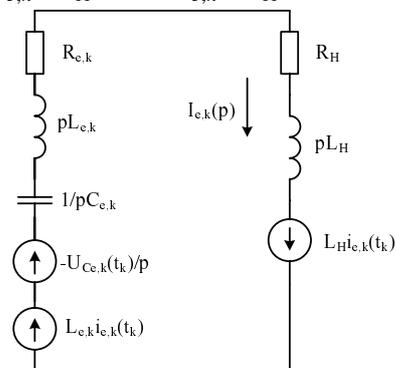


Рис. 2. Послекоммутационная схема

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

Из (3) операторное изображение тока определится как

$$I_{e,k}(p) = -\frac{UC_{e,k}(t_k)}{p \cdot Z^*(p)} + \frac{L^*}{Z^*(p)} i_{e,k}(t_k). \quad (5)$$

Если величина параметра  $r = R^* / \sqrt{\frac{L^*}{C_{e,k}}} > 2$ , то

имеет место аperiодический характер разряда и операторное сопротивление (4) представимо в виде

$$Z^*(p) = \frac{L^* \cdot (p - p_1) \cdot (p - p_2)}{p}, \quad (6)$$

где  $p_{1,2} = -\frac{R^*}{2L^*} \pm \sqrt{\left(\frac{R^*}{2L^*}\right)^2 - \frac{1}{L^* C_{e,k}}}$ ,

причем  $|p_2| > |p_1|$  и  $p_1 \cdot p_2 = \frac{1}{L^* C_{e,k}}$ .

Используя соотношение (5) можно показать что, ток во временной области для  $t \geq t_k$  может быть представлен в виде

$$i_{e,k}(t) = i'_{e,k}(t) + i''_{e,k}(t), \quad (7)$$

где

$$i'_{e,k}(t) = -\frac{U_{Ce,k}(t_k)}{L^* \cdot (p_1 - p_2)} (e^{p_1 \cdot t} - e^{p_2 \cdot t}), \quad (8)$$

$$i''_{e,k}(t) = \frac{i_{e,k}(t_k)}{(p_1 - p_2)} (p_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} - p_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}). \quad (9)$$

Напряжение на емкости  $C_{e,k}$  определится [9] как

$$u_{Ce,k}(t) = U_{Ce,k}(t_k) + \frac{1}{C_{e,k}} \int_0^t i_{e,k}(t) dt. \quad (10)$$

Учитывая (8) и (9) напряжение может быть представлено в виде:

$$u_{Ce,k}(t) = U_{Ce,k}(t_k) + u'_{Ce,k}(t) + u''_{Ce,k}(t), \quad (11)$$

где

$$u'_{Ce,k}(t) = -\frac{U_{Ce,k}(t_k)}{p_1 - p_2} (p_2 \cdot e^{p_1 \cdot t} - p_1 \cdot e^{p_2 \cdot t}) - U_{Ce,k}(t_k) \quad (12)$$

$$u''_{Ce,k}(t) = \frac{1}{C_{e,k}} \cdot \frac{i_{e,k}(t_k)}{(p_1 - p_2)} (e^{p_1 \cdot t} - e^{p_2 \cdot t}) \quad (13)$$

Время достижения максимального значения тока (если таковой существует) определяется из (7) путем его дифференцирования по времени и приравнивания полученной производной нулю.

$$t_{\max} = \frac{1}{p_1 - p_2} \ln \frac{B_2 \cdot p_2}{B_1 \cdot p_1}, \quad (14)$$

где

$$B_1 = -U_{Ce,k}(t_k) + p_1 \cdot L^* \cdot i_{e,k}(t_k),$$

$$B_2 = -U_{Ce,k}(t_k) + p_2 \cdot L^* \cdot i_{e,k}(t_k).$$

Если  $r = R^* / \sqrt{\frac{L^*}{C_{e,k}}} = 2$ , то имеет место предель-

ный аperiодический (критический) характер разряда и операторное сопротивление (4) представимо в виде

$$Z^*(p) = \frac{L^* \cdot (p-a)^2}{p}, \quad (15)$$

где

$$a = -\frac{R^*}{2L^*}.$$

В этом случае в соотношении (7) составляющие тока будут иметь вид

$$i'_{e,k}(t) = -\frac{U_{Ce,k}(t_k)}{L^*} \cdot t \cdot e^{a \cdot t}, \quad (16)$$

$$i''_{e,k}(t) = i_{e,k}(t_k) \cdot (1 + a \cdot t) \cdot e^{a \cdot t}. \quad (17)$$

Составляющие напряжения, определяемого по выражению (11), имеют вид

$$u'_{Ce,k}(t) = -U_{Ce,k}(t_k) + U_{Ce,k}(t_k) \cdot (1 - a \cdot t) \cdot e^{a \cdot t}, \quad (18)$$

$$u''_{Ce,k}(t) = \frac{i_{e,k}(t_k)}{C_{e,k}} \cdot t \cdot e^{a \cdot t}. \quad (19)$$

Время достижения максимального значения тока (если таковой существует) вычисляется по формуле

$$t_{\max} = \frac{1}{a} \left( \frac{B_2}{B_1} - 1 \right), \quad (20)$$

где  $B_1 = \frac{U_{Ce,k}(t_k)}{L^*} - a \cdot i_{e,k}(t_k); \quad (21)$

$$B_2 = a \cdot i_{e,k}(t_k). \quad (22)$$

Если  $r = R^* / \sqrt{\frac{L^*}{C_{e,k}}} < 2$ , то имеет место колеба-

тельный характер разряда и операторное сопротивление (4) представимо в виде

$$Z^*(p) = \frac{L^* \cdot [(p-a)^2 + \omega^2]}{p}, \quad (23)$$

где  $a = -\frac{R^*}{2L^*}, \omega = \sqrt{\frac{1}{L^* C_{e,k}} - a^2}.$

Тогда в соотношении (7) составляющие тока будут иметь вид

$$i'_{e,k}(t) = -\frac{U_{Ce,k}(t_k)}{L^*} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot e^{a \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (24)$$

$$i''_{e,k}(t) = i_{e,k}(t_k) \cdot e^{a \cdot t} \cdot \left[ \cos(\omega \cdot t) + \frac{a}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \right]. \quad (25)$$

Составляющие напряжения в выражении (11) определяются следующим образом:

$$u'_{Ce,k}(t) = -\frac{U_{Ce,k}(t_k)}{L^* \cdot C_{e,k}} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{a^2 + \omega^2} \times \\ \times \left[ e^{a \cdot t} \cdot [a \cdot \sin(\omega \cdot t) - \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)] + \omega \right], \quad (26)$$

$$u''_{Ce,k}(t) = \frac{i_{e,k}(t_k)}{C_{e,k}} \cdot \frac{e^{a \cdot t}}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (27)$$

Время достижения максимального значения тока (если таковой существует) вычисляется по формуле

$$t_{\max} = \frac{1}{\omega} \arctg \left( -\frac{B_2}{B_1} \right), \quad (28)$$

где  $B_1 = -\frac{U_{Ce,k}(t_k) \cdot a}{L^* \cdot \omega} + i_{e,k}(t_k) \cdot \frac{a^2}{\omega} - i_{e,k}(t_k) \cdot \omega, \quad (29)$

$$B_2 = -\frac{U_{e,k}(t_k)}{L^*} + 2i_{e,k}(t_k) \cdot a. \quad (30)$$

Учитывая рассмотренные выше варианты можно утверждать, что задача 1 решена для любых возможных соотношений параметров схемы.

**Задача 2.** Пусть в момент времени  $t_k$   $k$ -ый ЕНЭ подключается параллельно нагрузке и эквивалентному  $k - 1$ -ому ЕНЭ, и операторная послекоммутационная схема имеет вид, показанный на рис. 3.

Применение теоремы Миллмана [10] позволяет преобразовать данную схему в схему, показанную на рис. 2. При этом имеют место следующие соотношения для ее параметров:

$$R_{e,k} = \frac{R^j}{\sum_{j=1}^k m_j}; \quad (31)$$

$$L_{e,k} = \frac{L'}{\sum_{j=1}^k m_j}; \quad (32)$$

$$C_{e,k} = C' \cdot \sum_{j=1}^k m_j. \quad (33)$$

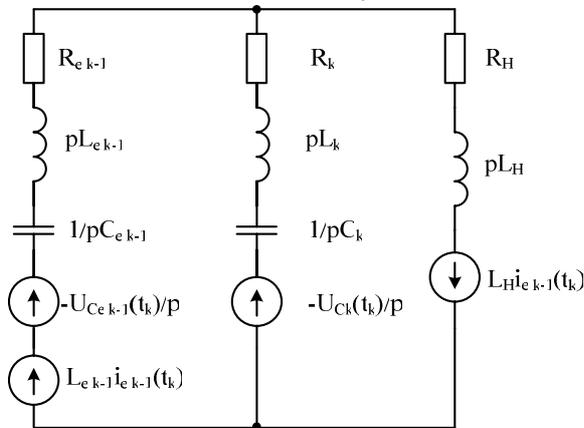


Рис. 3. Послекоммутационная схема двух ЕНЭ

$R_{e,k-1}$ ,  $L_{e,k-1}$ ,  $C_{e,k-1}$  – соответственно эквивалентные активное сопротивление, индуктивность и емкость ветви  $k-1$ -го эквивалентного ЕНЭ;  $U_{Ce,k-1}(t_k)$ ,  $i_{e,k-1}(t_k)$  – соответственно напряжение зарядки  $k-1$ -го эквивалентного ЕНЭ и ток в цепи в момент  $t_k$ ;  $R_k$ ,  $L_k$ ,  $C_k$ ,  $U_{Ck}(t_k)$  – соответственно активное сопротивление, индуктивность, емкость и напряжение зарядки подключаемого  $k$ -го ЕНЭ

Напряжения и токи рассчитываются по рекуррентным соотношениям:

$$U_{Ce,k}(t_k) = U_{Ce,k-1}(t_k) \cdot \sum_{j=1}^{k-1} m_j + U_{Ck}(t_k) \cdot m_k / \sum_{j=1}^k m_j; \quad (34)$$

$$i_{e,k}(t_k) = i_{e,k-1}(t_k), \quad (35)$$

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 нагрузке 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 задачи 1 (см. рис. 2) при условии, что  $R_{e,1} = R_1$ ,  $L_{e,1} = L_1$ ,  $C_{e,1} = C_1$ ,  $U_{Ce,1}(t_1) = U_{C1}(t_1)$ ,  $i_{e,1}(t_1) = 0$ .

В момент времени  $t = t_2$  подключается второй ЕНЭ и эквивалентная схема разрядной цепи принимает вид, показанный на рис. 3. Далее перейдем к схеме, показанной на рис. 2, предварительно рассчитав параметры эквивалентного ЕНЭ по соотношениям (31) – (35)

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

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

где  $i_{e,1}(t_2)$  и  $U_{Ce,1}(t_2)$  – соответственно ток в цепи и напряжение на первом конденсаторе в момент  $t_{2-0}$ , т.е. до момента коммутации (подключения второго ЕНЭ), которые определяются из решения задачи 1.

Продолжая процесс расчета подобным образом, мы можем последовательно рассчитать изменение тока в нагрузке для каждого из интервалов  $[t_1 = 0, t_2]$ ,  $[t_2, t_3]$ , ...,  $[t_{k-1}, t_k]$ , ...,  $[t_n, \infty)$ .

Как следует из соотношений (4) и (31) – (33), параметр  $r$ , определяющий характер тока в нагрузке, имеет вид

$$r = R_H \cdot \sum_{j=1}^k m_j + R' / \sqrt{\frac{L_H \cdot \sum_{j=1}^k m_j + L'}{C'}}. \quad (36)$$

Из выражения (36) видно, что:

– с увеличением количества подключенных ЕНЭ растет и значение  $r$ , что характеризует возрастание степени затухания импульса тока в нагрузке;

– после подключения последнего  $k$ -го ЕНЭ характер режима разряда соответствует характеру режима разряда при одновременном подключении всех ЕНЭ.

Таким образом, если после подключения последнего  $k$ -го ЕНЭ имеет место аperiodический характер разряда, то при подключении предыдущих  $k-1$ -го ЕНЭ может иметь место колебательный режим разряда, что должно быть учтено при выборе элементной базы испытательной установки.

На рис. 4 и рис. 5 показана возможность управления формой импульса тока в нагрузке при программируемой коммутации пяти подобных ЕНЭ, в сумме содержащих 15 одинаковых модулей. Графики изменения импульса тока представлены в безразмерном виде. В качестве базовых величин принимались емкость и индуктивность модуля и наибольшее напряжение зарядки ЕНЭ  $U_{max}$ . Тогда безразмерный аналог времени определится как  $\tau = t / \sqrt{L' \cdot C'}$ , соответственно  $\Delta\tau = \Delta t / \sqrt{L' \cdot C'}$ ; безразмерный аналог сопротивления  $r = R \sqrt{C' / L'}$ ; безразмерные аналоги индуктивности и емкости соответственно  $L^* = L / L'$ ,  $C^* = C / C'$ ; безразмерный аналог значений тока

$$I(\tau) = \frac{i(t)}{U_{max}} \sqrt{\frac{L'}{C'}}.$$

На рис. 4 представлены стилизованные формы импульса тока при одинаковом напряжении зарядки и темпе подключения ЕНЭ –  $\Delta\tau$ . График 1 представляет импульс тока при одновременном включении всех пяти ЕНЭ. График 2 показывает изменение значений импульса тока для варианта, когда каждый ЕНЭ содержит три модуля  $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 3$ ,  $\Delta\tau = 3,16$ . График 3 ( $m_1 = 5, m_2 = 4, m_3 = 3, m_4 = 2, m_5 = 1, \Delta\tau = 3,16$ ) и график 4 ( $m_1 = 1, m_2 = 2, m_3 = 3, m_4 = 4, m_5 = 5, \Delta\tau = 3,16$ ) иллюстрируют влияние порядка подключения ЕНЭ на форму импульса тока.

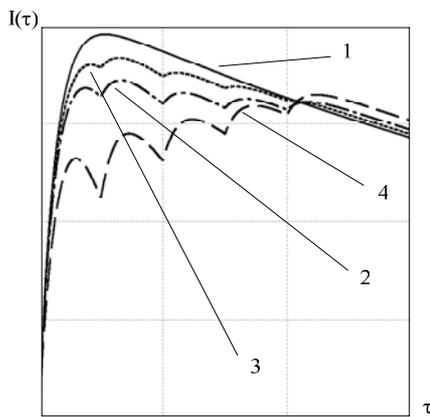


Рис. 4. Изменение формы импульса тока при одинаковом напряжении зарядки ЕНЭ

Как видно из рис. 4, изменяя количество модулей в ЕНЭ и порядок их включения при одинаковом напряжении зарядки и темпе подключения можно в широких пределах регулировать время нарастания импульса тока до максимального значения.

На рис. 5 представлены графики с различным напряжением зарядки для варианта  $m_1 = 1, m_2 = 2, m_3 = 3, m_4 = 4, m_5 = 5, \Delta\tau = 3,16$ . График 1 – одновременное включение всех пяти ЕНЭ. График 2 построен при условии  $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = U_{C5} = 1, \Delta\tau = 3,16$ . На графике 3 показан импульс с квазипостоянной вершиной, полученный подбором величины напряжения зарядки ЕНЭ:  $U_{C1} = 1; U_{C2} = 0,87; U_{C3} = 0,845; U_{C4} = 0,784; U_{C5} = 0,759; \Delta\tau = 3,16$ . Максимальное значение каждого колебания на вершине одинаково. График 4 отражает импульс тока с монотонным нарастанием и спадом значений при следующих значениях напряжений зарядки:  $U_{C1} = 1; U_{C2} = 0,6; U_{C3} = 0,45; U_{C4} = 0,39; U_{C5} = 0,31, \Delta\tau = 3,16$ .

Как видно из рис. 5, изменение напряжения зарядки ЕНЭ позволяет формировать различные по форме импульсы тока в нагрузке.

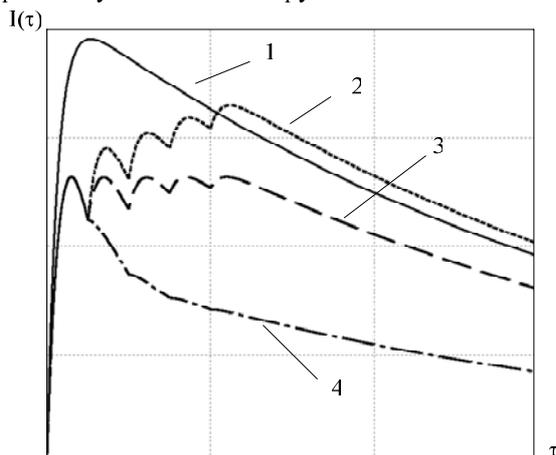


Рис. 5. Изменение формы импульса тока в зависимости от напряжения зарядки ЕНЭ и порядка их включения

Таким образом, при одном и том же модульном составе испытательной установки, управляя временем включения ЕНЭ, напряжениями зарядки ЕНЭ и количеством модулей, можно формировать импульсы тока с АВП, изменяющимися в широком диапазоне.

## ВЫВОДЫ

1. Получены аналитические соотношения для расчета импульса тока в активно-индуктивной нагрузке при программируемом разряде на нее подобных емкостных накопителей энергии.

2. Показано, что в зависимости от количества модулей в ЕНЭ, параметров нагрузки и модуля может иметь место различный характер тока в нагрузке. Причем по мере подключения ЕНЭ увеличивается степень затухания импульса тока.

3. Представлен анализ влияния программы включения емкостных накопителей энергии и отношения их напряжений зарядки на форму импульса тока.

Материалы статьи могут быть использованы для исследования возможностей формирования импульса тока с заданным характером изменения значений во времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Применение мощных генераторов импульсных напряжений в схеме с замыкателем нагрузки для получения больших импульсных токов молнии // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ "ХПИ". – №4. – 2004. – С. 37 – 45.
2. Баранов М.И., Игнатенко Н.Н. Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков: НТУ "ХПИ". – №49. – 2005. – С. 3 – 14.
3. Петков А.А. Разряд двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку // 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.
4. Губарев Г.Г., Северин В.П. Оптимизация параметров импульсных источников питания // Электричество. – 1983. – №1. – С. 64 – 65.
5. Губарев Г.Г., Конотоп В.В. Трехкритериальная оптимизация импульсных источников питания // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. – №6. – С. 66 – 73.
6. Фридман Б.Э. Переходные процессы при программируемом разряде емкостного накопителя энергии // Электричество. – 1989. – №12. – С. 36 – 41.
7. Емелин П.Ю., Рутберг Ф.Г., Фридман Б.Э. Исследование программируемого разряда емкостного накопителя энергии // Известия академии наук. Энергетика. – 1994. – №3. – С. 41 – 49.
8. Фридман Б.Э. Формирование импульса тока при программируемом разряде емкостного накопителя энергии // Электричество. – 1999. – №6. – С. 42 – 48.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с.
10. Конторович М.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. – М.: Сов. радио, 1975. – 320 с.

Поступила 21.05.2009

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