

А.А. ПЕТКОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

РАЗРЯД ДВУХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА ОБЩУЮ НАГРУЗКУ

У роботі досліджена зміна форми імпульсу струму в навантаженні при різних співвідношеннях параметрів схеми. Визначено область співвідношення параметрів, у якій у навантаженні формується уніполярний імпульс струму з монотонним наростанням і спадом.

In work the current impulse form change is investigated at various ratios of the scheme parameters. The range of the parameters ratio in which in loading the unipolar current impulse with monotonous increase and droop is formed is defined.

Постановка проблемы. В практике испытаний технических средств на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов возникает необходимость формирования импульсов тока большой амплитуды (сотни кА) и длительности (тысячи мкс). Для создания таких импульсов используется разряд нескольких емкостных накопителей (ЕНЭ) с различным уровнем зарядного напряжения на общую нагрузку. Данные устройства обеспечивают формирование импульсов тока различной формы и для обеспечения процесса их проектирования необходимо иметь информацию об областях изменения параметров цепей ЕНЭ, при которых в нагрузке могут быть сформированы импульсы тока той или иной формы.

Анализ публикаций. Параллельной работе нескольких ЕНЭ на одну нагрузку посвящен ряд публикаций [1 - 4]. В [1] приведены результаты численного и экспериментального исследования переходного процесса при параллельной работе двух генераторов импульсов напряжения на активно-индуктивную нагрузку. Для формирования тока молнии (длительность фронта 2 мкс, длительность импульса 50 мкс) в работе было исследовано замыкание нагрузки. В [2] представлено аналитическое решение системы операторных уравнений, описывающих переходный процесс при работе генераторов больших импульсных токов с корректирующей цепью на RL-нагрузку. В расчетной схеме генератор и параллельно включенная корректирующая цепь представлены RLC-звеньями, что также соответствует эквивалентной схеме совместной работы ЕНЭ на общую нагрузку. Аналитическое выражение для тока в нагрузке получено при условии, что активное сопротивление нагрузки много больше активных сопротивлений генератора и корректирующей цепи. В [3, 4] рассмотрено решение задачи выбора параметров элементов импульсных источников питания, работающих на общую нагрузку, как задачи оптимизации по различным критериям. В [4] также проанализировано уменьшение суммарной энергоемкости устройств, формирующих импульсы тока с коротким фронтом и длинным спадом значений, при использовании нескольких импульсных источников питания. Показано, что уменьшение энергоемкости

особенно эффективно в случае, когда длительность спада превышает в сто и более раз длительность фронта.

В рассмотренных публикациях решаются специфичные задачи, что не позволяет провести обобщение их результатов для целей анализа формы генерируемого импульса тока. Необходимость такого анализа вызвана тем, что испытательные импульсы тока должны иметь строго регламентированную форму, задаваемую нормативными документами, например [5 - 7]. Одной из наиболее широко используемой формы импульса тока является аperiodическая форма с монотонным нарастанием и спадом значений. Такие импульсы, в частности, используются при испытаниях на стойкость к разрядам молнии [8].

Целью настоящей работы является определение области соотношения параметров ЕНЭ, обеспечивающих формирование аperiodического импульса тока с монотонным нарастанием и спадом его значений.

Материалы и результаты исследований. Рассмотрим схему разряда двух ЕНЭ на RL-нагрузку, приведенную на рис. 1.

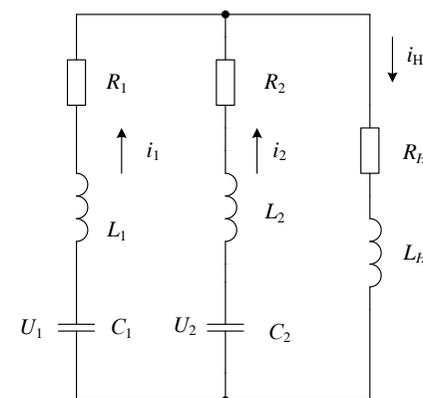


Рис. 1. Схема разряда двух ЕНЭ на общую нагрузку.

U_1, C_1, R_1, L_1 – зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность ЕНЭ1; U_2, C_2, R_2, L_2 – зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность ЕНЭ2; R_N, L_N – активное сопротивление и индуктивность нагрузки; i_1, i_2, i_N – соответственно ток в ветвях ЕНЭ1, ЕНЭ2 и нагрузке

Можно показать, что переходный процесс в этой схеме описывается следующей системой интегро-дифференциальных уравнений с безразмерными переменными.

$$\begin{cases} r_1 I_1 + \frac{dI_1}{d\tau} + \int I_1 d\tau - r_2 I_2 - L_{21} \frac{dI_2}{d\tau} - \frac{1}{C_{21}} \int I_2 d\tau = 1 - U_{21}; \\ r_2 I_2 + L_{21} \frac{dI_2}{d\tau} + \frac{1}{C_{21}} \int I_2 d\tau + r_H I_H + L_{H1} \frac{dI_H}{d\tau} = U_{21}; \\ I_H = I_1 + I_2, \end{cases} \quad (1)$$

где $r_1 = \frac{R_1}{\sqrt{L_1}}$, $r_2 = \frac{R_2}{\sqrt{L_1}}$, $r_H = \frac{R_H}{\sqrt{L_1}}$ – безразмерные аналоги активных со-

противлений;

$\tau = \frac{t}{\sqrt{L_1 C_1}}$ – безразмерный аналог времени;

$I_1 = \frac{i_1}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$, $I_2 = \frac{i_2}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$, $I_H = \frac{i_H}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ – безразмерные аналоги то-

ков;

$L_{21} = \frac{L_2}{L_1}$, $L_{H1} = \frac{L_H}{L_1}$, $C_{21} = \frac{C_2}{C_1}$, $U_{21} = \frac{U_2}{U_1}$ – безразмерные аналоги ин-

дуктивностей, емкости и зарядного напряжения.

Как видно из (1), переходный процесс в схеме определяется семью безразмерными величинами: r_1 , r_2 , r_H , L_{21} , L_{H1} , C_{21} , U_{21} . В зависимости от соотношения между ними импульс тока в нагрузке может иметь различный вид. Стилизованные формы импульса тока, генерируемые в нагрузке, приведены на рис. 2.

Поставим задачу определения соотношения безразмерных параметров, при которых импульс тока имеет аperiодическую форму с монотонным нарастанием и спадом значений (см. рис. 2а): $\frac{dI_H}{d\tau} > 0$ при $\tau \in (0, \tau_{\max})$,

$\frac{dI_H}{d\tau} \leq 0$ при $\tau > \tau_{\max}$, где τ_{\max} – время достижения максимального значения тока в нагрузке. Решить поставленную задачу в аналитическом виде не представляется возможным. Алгоритм численного решения может быть описан следующим образом.

1. Задаемся набором безразмерных параметров и вычисляем множество значений тока нагрузки $I_H = f(\tau)$.

2. На множестве рассчитанных значений определяем время достижения максимального значения тока – τ_{\max} и его величину – I_{\max} .

3. Фиксируем наличие экстремумов в интервалах $(0, \tau_{\max})$ и (τ_{\max}, ∞) .

Результаты численного анализа (проведенного при $r_1 = 1$; $r_H = 0,5$; $L_{H1} = 5$; $C_{21} = 100$; $U_{21} = 0,1$), представлены на рис. 3. При изменении L_{21} в интервале $[0,4; 1,2]$ в зависимости от величины r_2 имеют место следующие области с характерной формой импульса тока. При изменении r_2 в интервале $[0; r_{2,1})$ в нагрузке формируется униполярный импульс тока с колебаниями на фронте (область 1). Переход величины r_2 в интервал $(r_{2,1}; r_{2,2})$ характеризуется перемещением колебательности на спад импульса, которое происходит за счет уменьшения величины максимума тока (область 2). При дальнейшем увеличении r_2 в интервал $(r_{2,2}; r_{2,3})$ в нагрузке формируется аperiодический униполярный импульс с монотонным нарастанием и спадом (область 3).

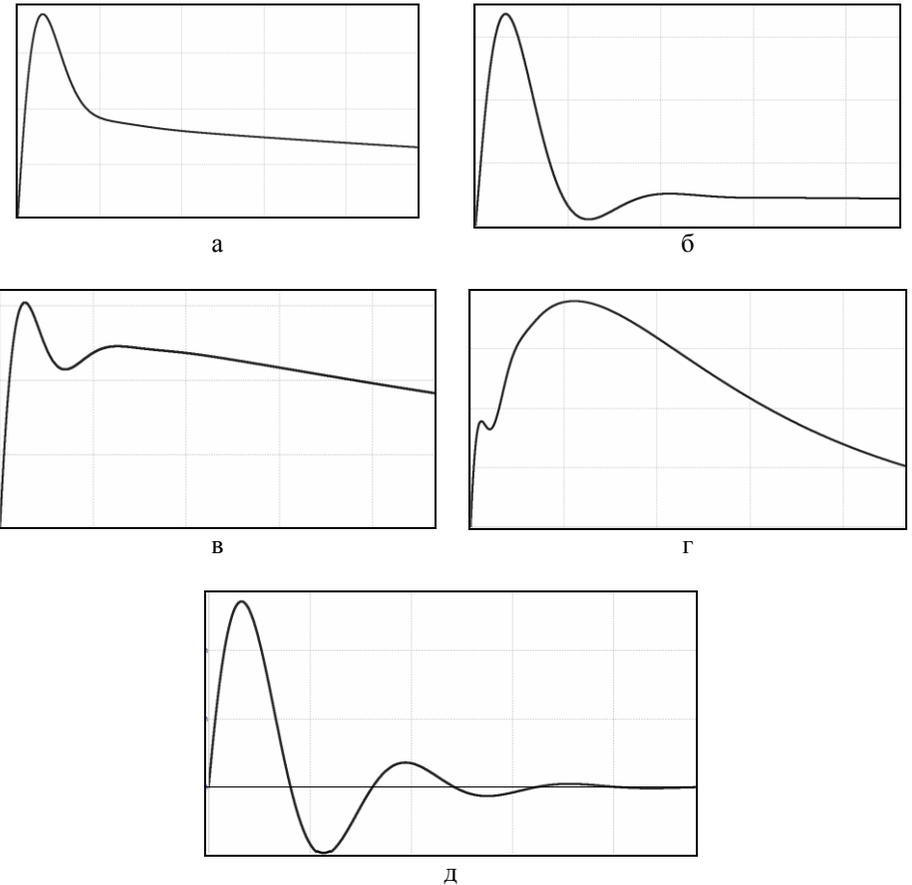


Рис. 2. Формы импульсов тока

Связь r_2 и L_{21} для границ этой области имеет вид:
для нижней границы

$$r_{2,2} = 0,2028 L_{21}^2 + 0,1345 L_{21} + 0,4266, \quad (2)$$

для верхней границы

$$r_{2,3} = -0,1285 L_{21}^2 + 0,3105 L_{21} + 1,2287. \quad (3)$$

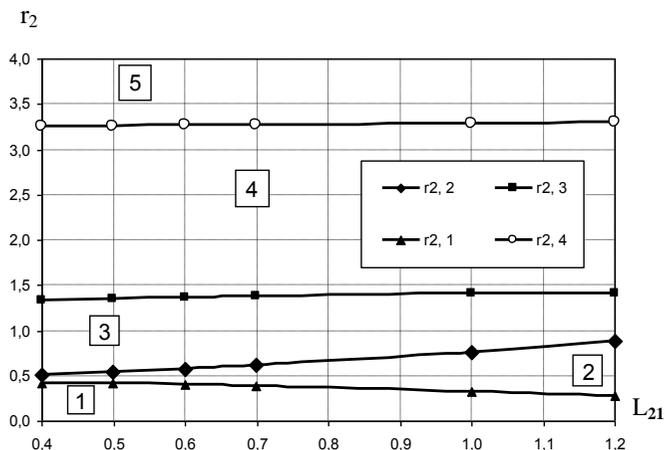


Рис. 3. Области изменения формы импульса тока в нагрузке.

- 1 – область униполярного импульса тока с колебаниями на фронте (рис. 2г);
2 – область униполярного импульса тока с колебаниями на спаде (рис. 2в);
3 – область униполярного аperiodического импульса тока с монотонным нарастанием и спадом (рис. 2а); 4 – область униполярного импульса тока с колебаниями на спаде (рис. 2б); 5 – область периодического затухающего импульса тока (рис. 2д)

Дальнейшее увеличение сопротивления r_2 в интервал $(r_{2,3}; r_{2,4})$ приводит вновь к появлению колебательности на спаде импульса тока в нагрузке (область 4), которая, при дальнейшем увеличении $r_2 > r_{2,4}$ (область 5), вызывает появление отрицательных значений импульса тока и, при $r_2 \rightarrow \infty$, имеет место затухающий колебательный импульс тока, показанный на рис 2д.

Таким образом, в исследованном диапазоне изменения соотношения параметров схемы, аperiodический импульс имеет место только в области, ограниченной значениями, определяемыми по соотношениям (2) и (3).

Выводы.

1. В работе приведена система безразмерных уравнений, описывающих переходный процесс при разряде двух ЕНЭ на общую нагрузку.

2. Показано, что в зависимости от соотношения параметров схемы возможно формирование пяти характерных видов импульса тока в нагрузке.

3. 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.

Результаты данной работы могут являться базой для дальнейших исследований формирования импульса тока в нагрузке, при одновременном разряде на нее двух и более емкостных накопителей энергии.

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. Губарев Г.Г., Северин В.П. Оптимизация параметров импульсных источников питания // Электричество. – 1983. - №1. – С. 64 – 65. 4. Губарев Г.Г., Конотов В.В. Трехкритериальная оптимизация импульсных источников питания // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. - №6. – С. 66 – 73. 5. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической изоляции. Межгосударственный стандарт. Минск: Издательство стандартов, 1998. – 31 с. 6. ГОСТ Р 50649-94 Устойчивость к импульсному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1994. – 20 с. 7. ГОСТ Р 51317.412-99 Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2000. – 28 с. 8. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.

Поступила в редколлегию 10.10.2007.