

УДК 621.31

О.В.ОЛЕЙНИК, НТУ «ХПИ»;

А.А.ПЕТКОВ, канд.техн.наук, проф.; НТУ «ХПИ»

ФОРМИРОВАНИЕ АПЕРИОДИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ПРИ РАЗРЯДЕ 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. При испытании технических объектов, содержащих радиоэлектронную и электротехническую аппаратуру на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов (например, на устойчивость к воздействию импульсного тока молнии), возникает необходимость формирования импульсов тока большой амплитуды (сотни кА) и длительности (тысячи мкс). Одной из наиболее широко используемой при испытаниях формой импульса тока является аperiodическая форма с монотонным нарастанием и спадом значений. Для создания таких импульсов используется разряд нескольких емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) с различным уровнем зарядного напряжения на общую нагрузку.

Анализ публикаций. Параллельной работе нескольких ЕНЭ на одну нагрузку посвящен ряд публикаций [1-5].

В [1] приведены результаты численного и экспериментального исследования переходного процесса при параллельной работе двух генераторов им-

пульсных напряжений на активно-индуктивную нагрузку. Для формирования тока молнии (длительность фронта – 2 мкс, длительность импульса – 50 мкс) в работе было исследовано замыкание нагрузки.

В [2] представлены системы операторных уравнений, описывающих переходный процесс при работе генераторов больших импульсных токов с корректирующей цепью на RL-нагрузку. 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.

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 показано, что применение схем с параллельной работой емкостных накопителей энергии после проведения трехкритериальной оптимизации позволяет уменьшить суммарную энергоемкость импульсных источников в десятки раз. Показано, что уменьшение энергоемкости особенно эффективно в случае, когда длительность спада превышает в сто и более раз длительность фронта.

В [5] показано, что 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.

Как видно из проведенного анализа в публикациях [1-4] решаются специфические задачи, отражающие конструктивные особенности схемных решений и переходные процессы в их разрядных цепях, вопросы оптимизации испытательных устройств, но не проводится анализ формы генерируемого импульса тока, а материалы, приведенные в [5], имеют ограниченную область применения. Отсутствие в рассмотренных работах конкретных рекомендаций по выбору параметров элементов разрядной цепи в режиме формирования апериодического импульса тока с монотонным нарастанием и спадом значений, а также использование таких импульсов при испытаниях [6, 7] позволяет считать актуальной задачу анализа такого режима при параллельной работе двух ЕНЭ на активно-индуктивную нагрузку.

Целью данной статьи является исследование соотношений параметров элементов разрядной цепи, обеспечивающих формирование апериодического импульса тока с монотонным нарастанием при параллельной работе двух ЕНЭ на активно-индуктивную нагрузку.

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

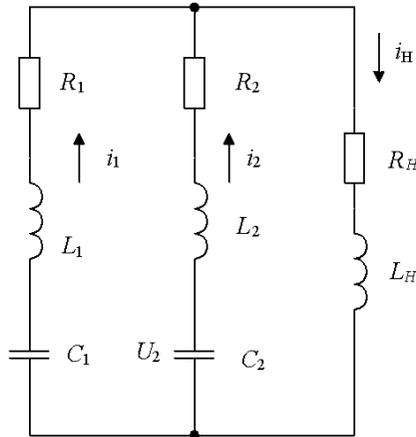


Рисунок 1 – Схема разряда двух ЕНЭ на общую нагрузку

На рисунке приняты следующие обозначения: 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_H , L_H – активное сопротивление и индуктивность нагрузки; i_1 , i_2 , i_H – соответственно ток в ветвях ЕНЭ1, ЕНЭ2 и нагрузке.

Как показано в [5], переходный процесс в данной схеме определяется рядом безразмерных параметров: r_1 , r_2 , r_H , L_{21} , L_{H1} , C_{21} , U_{21}

$$\text{где } r_1 = \frac{R_1}{\sqrt{L_1/C_1}}, \quad r_2 = \frac{R_2}{\sqrt{L_2/C_2}}, \quad r_H = \frac{R_H}{\sqrt{L_H/C_H}} \quad - \text{ безразмерные аналоги}$$

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

$$I_1 = \frac{i_1}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad I_2 = \frac{i_2}{U_2} \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}, \quad I_H = \frac{i_H}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad - \text{ безразмерные аналоги токов;}$$

$$L_{21} = \frac{L_2}{L_1}, \quad L_{H1} = \frac{L_H}{L_1}, \quad C_{21} = \frac{C_2}{C_1}, \quad U_{21} = \frac{U_2}{U_1} \quad - \text{ безразмерные аналоги индуктивностей, емкости и зарядного напряжения.}$$

В зависимости от соотношения между указанными безразмерными величинами импульс тока может иметь различный вид.

На практике значительный интерес представляет описание области соотношений безразмерных параметров, в которой импульс тока имеет аperiodическую форму с монотонным нарастанием и спадом значений (см. рис.

2). Такой импульс определяется следующими условиями: $\frac{di_H}{dt} > 0$ – при на-

растании значений импульса тока; $\frac{di_H}{dt} = 0$ – в момент достижения максимального значения; $\frac{di_H}{dt} < 0$ – при спаде значений.

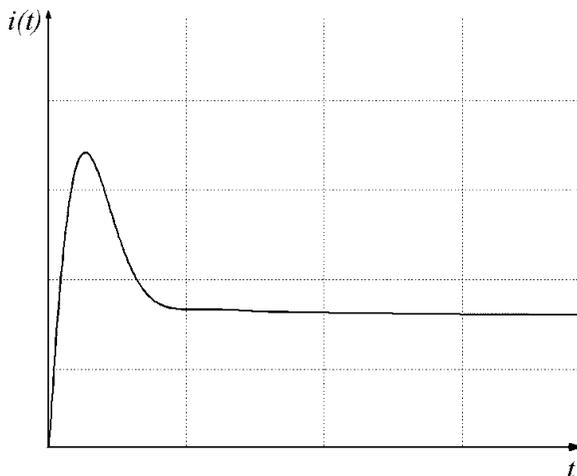


Рисунок 2 – Характерный вид униполярного аperiodического импульса с монотонным нарастанием и спадом значений

Для определения области монотонности были проведены численные эксперименты при изменении L_{21} и r_2 . Остальные безразмерные величины принимались постоянными: $r_1 = 1$; $r_H = 0,5$; $L_{H1} = 3$; $C_{21} = 1000$; $U_{21} = 0,1$. Алгоритм определения области монотонности состоял в многократном выполнении следующей процедуры:

- 1 Задание набора параметров схемы, показанной на рис. 1;
- 2 Определение временной зависимости импульса тока в нагрузке (с помощью системы схемотехнического моделирования Micro-Cap 8);
- 3 Проверка условий монотонности и формирование области монотонности.

Проведенные расчеты показали, что область монотонности имеет вид, представленный на рис. 3. При изменении L_{21} в интервале от 0 до 0,568 в зависимости от величины r_2 имеют место изменения формы импульса. Область параметров, при которых формируется униполярный аperiodический импульс тока с монотонным нарастанием и спадом заключена между верхней и нижней границей. Ниже области монотонности в нагрузке формируется униполярный импульс тока с колебаниями на фронте (рис. 4), выше области монотонности – униполярный импульс то-

ка с колебаниями на спаде (рис. 5).

Для испытательных импульсов тока кроме описания его стилизованной формы задаются амплитудно-временные параметры (АВП) [6, 7].

Поставим задачу построения зависимостей АВП импульса в нагрузке от параметров элементов разрядной цепи, показанной на рис. 1.

Предварительные расчеты показали, что в пределах области монотонности АВП импульса тока имеют существенно нелинейную зависимость от r_2 и L_{21} . Построение таких зависимостей возможно с использованием аппарата планирования эксперимента и, в частности, применением ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП) [8].

Для исследования характера зависимостей в области монотонности была выбрана прямоугольная область, показанная на рис. 3 пунктирной линией. Координаты угловых точек этой области приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	Номер точки			
	1	2	3	4
r_2	0,4	0,7	0,7	0,4
L_{21}	0	0	0,2	0,2

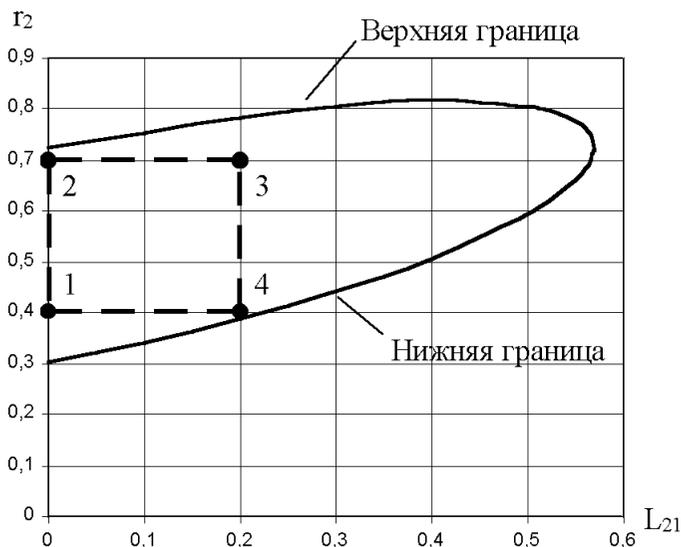


Рисунок 3 – Область формирования в нагрузке аperiodического импульса тока с монотонным нарастанием и спадом значений

В результате проведения ОЦКП были получены следующие выражения

для АВП импульсного тока, представленные в безразмерном виде.

$$\tau_{\max} = 4,94 - 2,17L_{21} - 4,37r_2 + 3,33L_{21}r_2 - 3,333L_{21}^2 + 2,96r_2^2; \quad (1)$$

$$\tau_{C0,1} = 1585 + 295L_{21} + 815r_2 - 200L_{21}r_2 - 217L_{21}^2 - 563r_2^2; \quad (2)$$

$$\tau_{C0,01} = 2726 + 301L_{21} + 3123r_2 - 216L_{21}r_2 - 216L_{21}^2 - 562r_2^2; \quad (3)$$

$$i_{\max} = 0,097 - 0,05L_{21} + 0,147r_2 + 0,04L_{21}r_2 + 0,036L_{21}^2 - 0,05r_2^2, \quad (4)$$

где τ_{\max} – безразмерный аналог времени достижения максимального значения импульсного тока; $\tau_{C0,1}$ – безразмерный аналог длительности спада импульса до уровня 0,1 от максимального значения; $\tau_{C0,01}$ – безразмерный аналог длительности спада импульса до уровня 0,01 от максимального значения; i_{\max} – безразмерный аналог максимального значения тока.

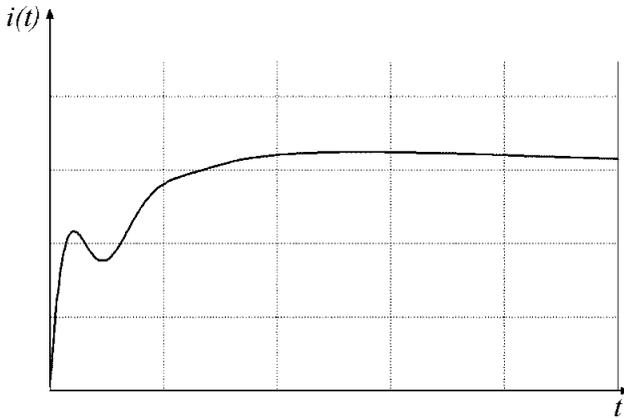


Рисунок 4 – Характерный вид униполярного импульса с колебанием на фронте

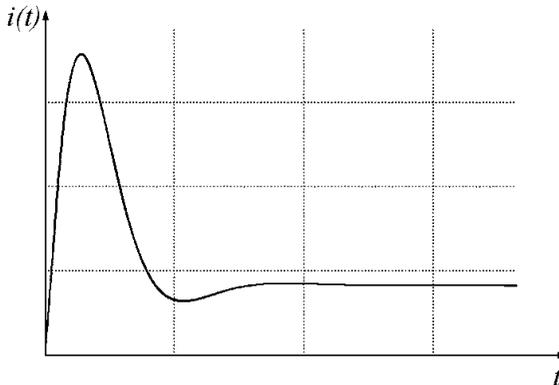


Рисунок 5 – Характерный вид униполярного импульса тока с колебанием на спаде

Относительная погрешность вычислений по соотношениям (1) – (4) не превышает 9 %.

В качестве иллюстрации использования полученных в работе соотношений произведем расчет амплитудно-временных характеристик импульса тока (в нормированном виде), который формируется при параллельной работе двух ЕНЭ испытательной установки, описанной в [9]. Электрические параметры ЕНЭ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Источник питания	Номинальное напряжение, U , кВ	Емкость в разряде, C , мФ	Собственное активное сопротивление, R , Ом	Собственная индуктивность, L , мкГн
ГИТ 1	40	3	0,129	5
ГИТ 2	4	300	0,0622	50

Исходя из данных таблицы, безразмерные величины принимают следующие значения: $r_1 = 1$; $r_2 = 0,48$; $r_H = 0,5$; $L_{21} = 0,1$; $L_{H1} = 3$; $C_{21} = 1000$; $U_{21} = 0,1$.

Вычисления по соотношениям (1) – (4) дают следующий результат:

$$\tau_{\max} = 3,43; \tau_{C0,1} = 1864; \tau_{C0,01} = 4117; i_{\max} = 0,153.$$

Для анализа точности расчетов АВП импульса тока было проведено схемотехническое моделирование переходного процесса (с использованием Micro-Cap 8) и получены следующие параметры импульса тока $\tau^*_{\max} = 3,228$; $\tau^*_{C0,1} = 1874$; $\tau^*_{C0,01} = 4129$; $i^*_{\max} = 0,151$. Сопоставление результатов показывает, что относительная погрешность вычислений не превышает 6%.

Выводы.

1. Определены границы области соотношения параметров схемы, в которой в нагрузке формируется униполярный импульс тока с монотонным нарастанием спадом его значений.
2. Построены аналитические модели для определения параметров апериодического импульса тока в нагрузке для области его монотонности в зависимости от параметров элементов разрядной цепи испытательной установки.

Материалы статьи могут быть использованы для дальнейших исследований испытательных устройств с несколькими ЕНЭ.

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., Конотоп В.В. Трехкритериальная оптимизация импульсных источников питания // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. – № 6. – С. 66-73. **5.** Петков А.А. Разряд двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 34. – 2007. – С. 79-85. **6.** 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. **7.** ГОСТ Р 51317.412-99 Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 28 с. **8.** Егоров А.Е., Азаров Г.Н., Коваль А.В. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента. / Под ред. В.Г. Воронова. – Х.: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. – 240 с. **9.** Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Хромов В.В. Методы и средства испытаний электрооборудования на стойкость к электромагнитным импульсам естественного и искусственного происхождения // Международный симпозиум по электромагнитной совместимости. ЭМС-93.(21-26 июня 1993 г.). Сборник научных докладов. – Ч. 3 – Санкт-Петербург: ЭЛТУ. – 1993. – С. 630-633.

Поступила в редколлегию 10.03.2009.