

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСА ТОКА С МОНОТОННЫМ НАРАСТАНИЕМ И СПАДОМ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ДВУХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

У роботі визначена область співвідношення параметрів схеми, при яких у навантаженні формується імпульс струму з монотонним наростанням і спадом значень. Наведено вирази для визначення значень елементів розрядного кола.

В работе определена область соотношения параметров схемы, при которых в нагрузке формируется импульс тока с монотонным нарастанием и спадом значений. Приведены выражения для определения значений элементов разрядной цепи.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Импульсы тока с монотонным нарастанием и спадом значений (монотонные импульсы) используются при испытаниях технических объектов на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов различного происхождения.

Одной из характеристик монотонного импульса является отношение длительности импульса к длительности нарастания его значений. Величина отношения для испытательных импульсов изменяется в широких пределах. При больших значениях указанного отношения экономически выгодно использовать для формирования монотонного импульса тока одновременный разряд двух емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) на общую нагрузку. Однако, имеющиеся в настоящее время методики расчета высоковольтных испытательных устройств на базе двух ЕНЭ, не могут полностью удовлетворить потребности проектирования, что инициирует дальнейшие исследования в этом направлении.

Анализ публикаций. Публикации, посвященные параллельной работе ЕНЭ, можно разделить на три группы:

- работы, в которых описаны действующие установки и их основные характеристики [1 – 3];
- публикации, освещающие результаты исследования переходных процессов [4 – 6];
- работы, в которых рассмотрена задача выбора параметров элементов разрядной цепи [7, 8].

В [1] описана экспериментальная установка ГИТ-Л, содержащая два ЕНЭ и формирующий блок. Такая структура установки позволяет формировать импульсы тока с максимальным значением до 400 кА и различными временными параметрами. В [2] рассматривается генератор тока, сооруженный на базе пяти ЕНЭ, позволяющий реализовать все основные составляющие тока молнии. При этом в некоторых режимах используется параллельная работа двух ЕНЭ. Комплекс испытательного высоковольтного оборудования, описанный в [3], включает три ЕНЭ, параллельная работа которых позволяет формировать импульсные токи, порождающие мощные микросекундные электромагнитные импульсы.

В [4] 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 [5] 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 [6] рассматривается схема разрядной цепи, показанная на рис. 1. Приведена система интегродифференциальных уравнений в безразмерном виде (1), которая описывает переходный процесс в рассматриваемой схеме.

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

где $r_1 = \frac{R_1}{\sqrt{L_1 C_1}}$, $r_2 = \frac{R_2}{\sqrt{L_1 C_1}}$, $r_H = \frac{R_H}{\sqrt{L_1 C_1}}$ – безраз-

мерные аналоги активных сопротивлений;

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

t – время;

$$I_1 = \frac{i_1}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad I_2 = \frac{i_2}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad I_H = \frac{i_H}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad -$$

безразмерные аналоги токов;

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

безразмерные аналоги индуктивностей, емкости и зарядного напряжения.

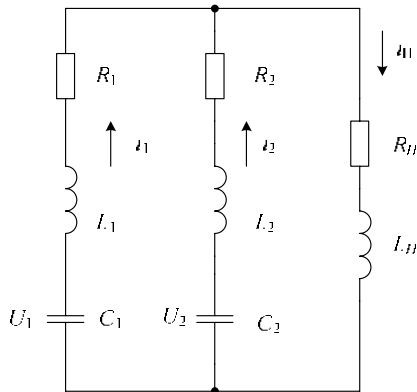


Рис. 1. Схема разряда двух ЕНЭ на общую нагрузку: U_1, C_1, R_1, L_1 – зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность ЕНЭ1; U_2, C_2, R_2, L_2 – зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность ЕНЭ2; R_H, L_H – активное сопротивление и индуктивность нагрузки; i_1, i_2, i_H – соответственно ток в ветвях ЕНЭ1, ЕНЭ2 и нагрузке

В работе показано, что при одновременном разряде двух ЕНЭ в RL – нагрузке могут формироваться импульсы тока пяти видов. Определена область монотонности импульса тока (область соотношения параметров элементов схемы на границе и внутри которой импульс тока имеет монотонный характер).

В [7, 8] рассмотрено решение задачи выбора параметров элементов импульсных источников питания, работающих на общую нагрузку, как задачи оптимизации по различным критериям. В [8] также проанализировано уменьшение суммарной энергоемкости устройств, формирующих импульсы тока с коротким фронтом и длинным спадом его 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.

Как видно из проведенного анализа, в большинстве публикаций отражено решение специфических задач параллельной работы ЕНЭ, которые не позволяют провести обобщенный анализ формы импульса тока в нагрузке. Таким образом, несмотря на актуальность создания испытательных импульсов тока, имеющих монотонный характер [9], вопросы их формирования с использованием двух ЕНЭ не достаточно полно отражены в литературе, что требует расширения и дополнения известных данных.

Целью настоящей работы является анализ закономерностей изменения параметров импульса тока в области монотонности.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Импульс тока с монотонным нарастанием и спадом значений, показанный на рис. 2, может быть идентифицирован следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{di_H}{dt} > 0 & \text{при } t \in (0, T_{\max}); \\ \frac{di_H}{dt} = 0 & \text{при } t = T_{\max}; \\ \frac{di_H}{dt} \leq 0 & \text{при } t > T_{\max}. \end{cases} \quad (2)$$

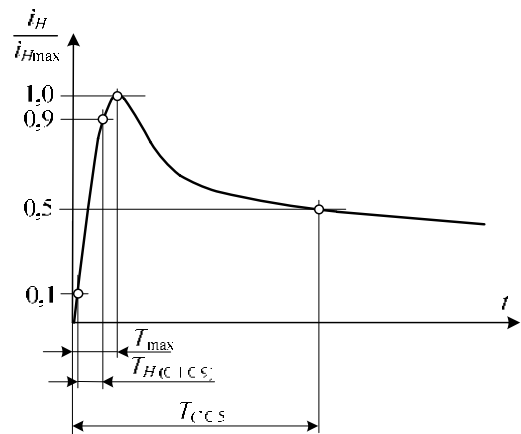


Рис. 2. Импульс тока с монотонным нарастанием и спадом значений: T_{\max} – время достижения максимального значения тока в нагрузке; $T_{H(0,1;0,9)}$ – время нарастания значений импульса тока от уровня 0,1 до уровня 0,9; $T_{C0,5}$ – время достижения на спаде уровня 0,5

Процедура анализа формируемых в схеме (рис. 1) импульсов тока производилась в следующем порядке:

- при выбранном наборе значений элементов схемы рассчитывались значения импульса тока как функции времени, то есть формировались два взаимосвязанных массива данных $\{t\}$ и $\{i_H(t)\}$;
- с использованием массивов проверялось выполнение условий (2);
- если условия монотонности выполнялись, то далее определялись: максимальное значение тока в нагрузке – $i_{H\max}$ и временные параметры импульса – $T_{H(0,1;0,9)}$, $T_{C0,5}$;

– если условия монотонности не выполнялись, данный импульс не обрабатывался и осуществлялся переход к другому набору значений элементов схемы.

Используя данные об области монотонности, полученные в [6] при фиксированном значении $L_{H1} = 5$, были проведены расчеты при $L_{H1} = 3 \dots 7$; $r_2 - \text{var}$; $L_{21} - \text{var}$. Остальные безразмерные параметры имели постоянное значение: $r_1 = 1$; $r_H = 0,5$; $C_{21} = 100$; $U_{21} = 0,1$. По результатам расчетов была определена область монотонности импульса тока, имеющая характерный вид, показанный на рис. 3.

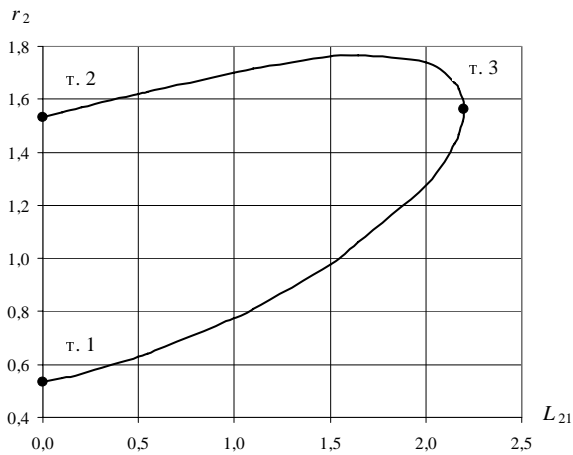


Рис. 3. Область монотонности импульса при $L_{H1} = 7$

Как видно из рисунка, область монотонности при указанных соотношениях параметров схемы является замкнутой и ограничена двумя кривыми линиями и осью $O r_2$:

- боковая граница – отрезок прямой линии между точками т.1 и т.2;
- верхняя граница – часть кривой линии между точками т.2 и т.3;
- нижняя граница – часть кривой линии между точками т.1 и т.3.

Точка т.3 характеризуется тем, что касательная к ней параллельна оси $O r_2$.

По результатам расчетов были определены уравнения координат узловых точек границы области монотонности, которые имеют вид:

– точка т.1

$$r_{2(t.1)} = -0,0033L_{H1}^2 + 0,101L_{H1} + 0,0147; \quad (3)$$

$$L_{21(t.1)} = 0; \quad (4)$$

– точка т.2

$$r_{2(t.2)} = -0,01L_{H1}^2 + 0,257L_{H1} + 0,228; \quad (5)$$

$$L_{21(t.2)} = 0; \quad (6)$$

– точка т.3

$$r_{2(t.3)} = -0,0112L_{H1}^2 + 0,298L_{H1} + 0,0263; \quad (7)$$

$$L_{21(t.3)} = -0,0056L_{H1}^2 + 0,415L_{H1} - 0,437. \quad (8)$$

Для описания границ области монотонности выражением вида $r_2 = f(L_{H1}, L_{21})$ был применен метод планирования многоуровневых экспериментов с использованием полиномов Чебышева [10]. В результате получено следующее уравнение связи параметров:

$$\begin{aligned} r_2 = & b_0 + b_{11} \cdot P_1(x_1) + b_{12} \cdot P_1(x_2) + b_{22} \cdot P_2(x_2) + \\ & + b_{32} \cdot P_3(x_2) + b_{42} \cdot P_4(x_2) + b_{11}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_1(x_2) + \\ & + b_{12}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_2(x_2) + b_{13}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_3(x_2) + \\ & + b_{14}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_4(x_2), \end{aligned} \quad (9)$$

где переменные имеют вид: $x_1 = \frac{L_{H1} - 5}{2}$,

$x_2 = \frac{L_{21} - 0,5}{0,5}$, а полиномы принимают следующие значения:

$$P_1(x_1) = x_1, \quad P_1(x_2) = x_2,$$

$$P_2(x_2) = x_2^2 - 2, \quad P_3(x_2) = \frac{5}{6}x_2^3 - \frac{17}{6}x_2,$$

$$P_4(x_2) = \frac{35}{12}x_2^4 - \frac{155}{12}x_2^2 + 6.$$

Для нижней границы r_2 (между точками т.1 и т.3) значения коэффициентов выражения (9) имеют вид:

$$b_0 = 0,7; \quad b_{11} = 0,222; \quad b_{12} = 0,191; \quad b_{22} = 4,59 \cdot 10^{-2};$$

$$b_{32} = 1,53 \cdot 10^{-2}; \quad b_{42} = 1,81 \cdot 10^{-3}; \quad b_{11}^* = 5,67 \cdot 10^{-2};$$

$$b_{12}^* = 1,59 \cdot 10^{-2}; \quad b_{13}^* = 3,7 \cdot 10^{-3}; \quad b_{14}^* = 4,14 \cdot 10^{-4}.$$

Для верхней границы r_2 (между точками т.2 и т.3) значения коэффициентов выражения (9) имеют вид:

$$b_0 = 1,28; \quad b_{11} = 0,36; \quad b_{12} = 1,85 \cdot 10^{-3}; \quad b_{22} = -3,6 \cdot 10^{-2};$$

$$b_{32} = -1,78 \cdot 10^{-2}; \quad b_{42} = -2,13 \cdot 10^{-3}; \quad b_{11}^* = 1,76 \cdot 10^{-2};$$

$$b_{12}^* = -9,54 \cdot 10^{-3}; \quad b_{13}^* = -6,1 \cdot 10^{-3}; \quad b_{14}^* = -7,29 \cdot 10^{-4}.$$

Изменение значения отношения безразмерного аналога времени достижения на спаде уровня 0,5 от максимального значения импульса тока

$$\tau_{C0,5} = \frac{T_{C0,5}}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

нарастания между уровнями 0,1 и 0,9 от максимального значения импульса тока

$$\tau_{H(0,1;0,9)} = \frac{T_{H(0,1;0,9)}}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

на границах монотонности показано на рис. 4. Как видно из рисунка, нижней границе монотонности (т.1 – т.3) соответствуют большие, а верхней (т.2 – т.3) – меньшие значения отношения контролируемых временных параметров.

Для $\frac{\tau_{C0,5}}{\tau_{H(0,1;0,9)}} = \frac{T_{C0,5}}{T_{H(0,1;0,9)}}$ получено следующее

соотношение, переменные и полиномы которого вычисляются аналогично (9)

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{C0,5}}{\tau_{H(0,1;0,9)}} = & b_0 + b_{11} \cdot P_1(x_1) + b_{12} \cdot P_1(x_2) + \\ & + b_{22} \cdot P_2(x_2) + b_{32} \cdot P_3(x_2) + b_{42} \cdot P_4(x_2) + \\ & + b_{11}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_1(x_2) + b_{12}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_2(x_2) + \\ & + b_{13}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_3(x_2) + b_{14}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_4(x_2), \end{aligned} \quad (10)$$

$\tau_{C0,5}/\tau_{H(0,1;0,9)}$

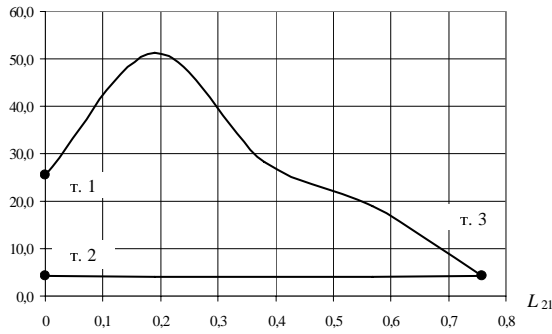


Рис. 4. Изменение отношения контролируемых временных параметров при $L_{H1} = 3$

– для нижней границы по r_2 (между точками т.1 и т.3)

$$b_0 = 23,9; \quad b_{11} = -1,87; \quad b_{12} = -7,759; \quad b_{22} = 3,59; \\ b_{32} = 3,46; \quad b_{42} = -0,448; \quad b_{11}^* = -0,277; \quad b_{12}^* = 1,21; \\ b_{13}^* = -0,871; \quad b_{14}^* = 0,709;$$

– для верхней границы по r_2 (между точками т.2 и т.3)

$$b_0 = 4,17; \quad b_{11} = 0,0348; \quad b_{12} = -6,63 \cdot 10^{-2}; \\ b_{22} = 5,77 \cdot 10^{-2}; \quad b_{32} = 0; \quad b_{42} = 0; \quad b_{11}^* = -8,69 \cdot 10^{-2}; \\ b_{12}^* = -1,21 \cdot 10^{-2}; \quad b_{13}^* = 0; \quad b_{14}^* = 0.$$

Как видно из рис. 4, для верхней границы по r_2 (между точками т.2 и т.3), изменение отношения

$$\frac{\tau_{C0,5}}{\tau_{H(0,1;0,9)}} \text{ мало. Напротив, при изменении парамет-$$

ров схемы в соответствии с нижней границей по r_2 (между точками т.1 и т.3), отношение изменяется достаточно сильно, а также имеется область, в которой одному и тому же значению отношения контролируемых временных параметров соответствуют различные значения L_{21} . Это позволяет произвести оптимальный выбор параметров r_2 и L_{21} , обеспечивающих заданное

$$\text{отношение } \left(\frac{\tau_{C0,5}}{\tau_{H(0,1;0,9)}} \right)^*.$$

На рис. 5 показан график изменения относительной энергии, выделяющейся в активном сопротивлении нагрузки $W^* = \frac{W_H}{W_1 + W_2}$, где W_H – энергия, выделяющаяся в активном сопротивлении нагрузки, W_1 – энергия, запасаемая ЕНЭ1, W_2 – энергия, запасаемая ЕНЭ2.

Величина W^* характеризует степень использования энергии, запасаемой в установке. Как видно из рисунка, при одних и тех же значениях L_{H1} относительная энергия выше на нижней границе зоны монотонности. Учитывая характер изменения W^* и возможность регулирования параметров установки, целесообразно выбирать режимы работы, соответствующие нижней границе области монотонности.

$W^*, \%$

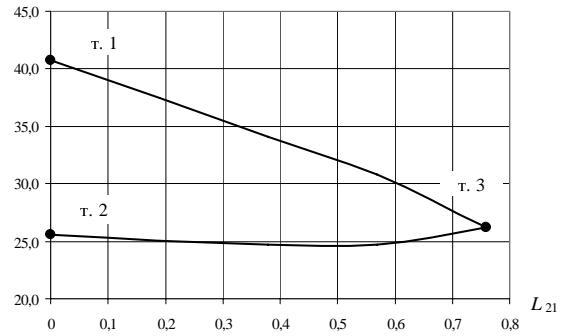


Рис. 5. Изменение относительной энергии при $L_{H1} = 3$

Расчеты показывают, что для безразмерных величин, характеризующих время нарастания и максимальное значение тока, имеют место следующие соотношения:

$$\tau_{H(0,1;0,9)} = b_0 + b_{11} \cdot P_1(x_1) + b_{12} \cdot P_1(x_2) + \\ + b_{22} \cdot P_2(x_2) + b_{32} \cdot P_3(x_2) + b_{42} \cdot P_4(x_2) + \\ + b_{11}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_1(x_2) + b_{12}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_2(x_2) + \\ + b_{13}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_3(x_2) + b_{14}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_4(x_2) \quad (11)$$

с коэффициентами для нижней границы по r_2 (между точками т.1 и т.3)

$$b_0 = 1,92; \quad b_{11} = 0,2; \quad b_{12} = -0,154; \quad b_{22} = 0,108; \\ b_{32} = -6,43 \cdot 10^{-3}; \quad b_{42} = 1,6 \cdot 10^{-2}; \quad b_{11}^* = -1,32 \cdot 10^{-2}; \\ b_{12}^* = 1,82 \cdot 10^{-3}; \quad b_{13}^* = 4,81 \cdot 10^{-2}; \quad b_{14}^* = -1,41 \cdot 10^{-2};$$

$$I_{\max} = b_0 + b_{11} \cdot P_1(x_1) + b_{12} \cdot P_1(x_2) + b_{22} \cdot P_2(x_2) + \\ + b_{11}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_1(x_2) + b_{12}^* \cdot P_1(x_1) \cdot P_2(x_2). \quad (12)$$

с коэффициентами для нижней границы по r_2 (между точками т.1 и т.3)

$$b_0 = 0,135; \quad b_{11} = -1,64 \cdot 10^{-2}; \quad b_{12} = 1,19 \cdot 10^{-2}; \\ b_{22} = 3,1 \cdot 10^{-3}; \quad b_{11}^* = 7,93 \cdot 10^{-4}; \quad b_{12}^* = -4,44 \cdot 10^{-4}.$$

В соотношения (11) и (12) переменные и полиномы вычисляются аналогично (9).

Погрешность соотношений, приведенных в работе, не превышает 10%.

Полученные в работе соотношения позволяют производить выбор параметров ЕНЭ для формирования в активно-индуктивной нагрузке импульса тока с монотонным нарастанием и спадом значений. Для этого используются следующие формулы, получаемые из (1) с учетом значений безразмерных параметров, имеющих фиксированное значение:

$$U_1 = \frac{2R_H \cdot i_{H\max}}{I_{\max}}; \quad (13)$$

$$C_1 = \frac{1}{2R_H} \cdot \frac{T_{H(0,1;0,9)}}{\tau_{H(0,1;0,9)}}; \quad (14)$$

$$L_1 = 2R_H \frac{T_{H(0,1;0,9)}}{\tau_{H(0,1;0,9)}}; \quad (15)$$

$$R_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}; \quad (16)$$

$$U_2 = 0,1U_1; \quad (17)$$

$$C_2 = 100C_1; \quad (18)$$

$$L_2 = L_1 \cdot L_{21}; \quad (19)$$

$$R_2 = 2R_H \cdot r_2; \quad (20)$$

Порядок вычислений рассмотрим на следующем примере.

В активно-индуктивной нагрузке $R_H = 1$ Ом и $L_H = 1 \cdot 10^{-5}$ Гн требуется сформировать апериодический импульс тока с монотонным нарастанием и спадом значений, имеющий следующие амплитудно-временные характеристики: $T_{H(0,1;0,9)} = 1 \cdot 10^{-5}$ с, $T_{C0,5} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ с и $i_{H \max} = 1 \cdot 10^3$ А.

Задаемся значением $L_{H1} = 7$ и решая уравнение (10) при $\frac{\tau_{C0,5}}{\tau_{H(0,1;0,9)}} = \frac{T_{C0,5}}{T_{H(0,1;0,9)}} = 35$ для нижней гра-

ницы монотонности, находим $L_{21} = 0,27$. Далее, используя (9), находим значение $r_2 = 1,148$. По (13) – (15), на основании исходных данных и соотношений (11) и (12), определяем: $U_1 = 2 \cdot 10^4$ В, $C_1 = 2,12 \cdot 10^{-6}$ Ф, $L_1 = 8,46 \cdot 10^{-6}$ Гн. Далее по (16) – (20) находим: $R_1 = 2$ Ом, $U_2 = 2 \cdot 10^3$ В, $C_2 = 2,12 \cdot 10^{-4}$ Ф, $L_2 = 2,29 \cdot 10^{-6}$ Гн, $R_2 = 1,15$ Ом. Расчетное значение дополнительной индуктивности, включаемой последовательно с нагрузкой, равно $L_D = L_{H1} \cdot L_1 - L_H = 4,92 \cdot 10^{-5}$ Гн.

Моделирование переходного процесса с рассчитанными параметрами схемы показало, что амплитудно-временные характеристики импульса тока в нагрузке отличаются от заданных значений не более чем на 5%.

ВЫВОДЫ

1. Определен вид области монотонности импульса тока. Получено описание границ области.

2. Показано, что для повышения степени использования энергии, целесообразно выбирать режимы работы, соответствующие нижней границе монотонности.

3. Приведены соотношения, связывающие временные параметры импульса тока и параметры элементов схемы для режимов, соответствующих нижней границе области монотонности.

Материалы статьи могут быть использованы для дальнейшего исследования испытательных установок, включающих параллельно работающие ЕНЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. - №3. – С. 81 – 85.

3. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Колобовский А.К., Кравченко В.И. Комплекс высоковольтного испытательного электрофизического оборудования экспериментальной базы НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ "ХПИ". - №4. – 2004. – С. 3 – 13.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Губарев Г.Г., Северин В.П. Оптимизация параметров импульсных источников питания // Электричество. – 1983. - №1. – С. 64 – 65.
8. Губарев Г.Г., Конотоп В.В. Трехкритериальная оптимизация импульсных источников питания // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. - №6. – С. 66 – 73.
9. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
10. Егоров А.Е., Азаров Г.Н., Коваль А.В. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента. / Под ред. В.Г. Воронова. – Харьков: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. – 240 с.

Поступила 07.11.2008

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