

**А.А. ПЕТКОВ**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., профессор, НТУ «ХПИ»

## **СИСТЕМА ДВУХ ЕНЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА С МОНОТОННЫМ НАРАСТАНИЕМ И СПАДОМ ЗНАЧЕНИЙ**

В работе получены модели амплитудно-временных параметров импульса тока в нагрузке, выведено соотношение, связывающее значения параметров элементов разрядной цепи при фиксированном значении отношения временных параметров импульса тока и предложена методика определения параметров элементов испытательной схемы с двумя емкостными накопителями энергии. Материалы статьи могут быть использованы для дальнейших исследований испытательных устройств с несколькими емкостными накопителями энергии.

**Ключевые слова:** емкостной накопитель энергии, импульс тока, амплитудно-временные параметры.

**Постановка проблемы.** При испытании технических средств на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов возникает необходимость формирования импульсов тока большой амплитуды и длительности. Одной из наиболее широко используемых при испытаниях формой импульса тока является аperiодическая 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. Учитывая, что испытаниям подвергаются различные объекты, к амплитудно-временным параметрам (АВП) импульсов тока предъявляются различные требования и на данный момент расчет схем формирования не может считаться окончанным и требует дополнительных исследований.

**Анализ публикаций.** Формированию испытательных импульсов тока с использованием нескольких накопителей энергии посвящен ряд публикаций [1-6].

В [1] приведены результаты исследования для формирования тока молнии (длительность фронта – 2 мкс, длительность импульса – 50 мкс) в работе было исследовано замыкание нагрузки.

В [2, 3] описана система ЕНЭ для формирования полного тока молнии, имеющего несколько составляющих. Рассмотрено устройство и работа системы в штатном и аварийных режимах работы.

Исследования, результаты которых приведены в [4], показали, что при параллельной работе двух ЕНЭ (см. рис. 1) временные параметры импульса тока в активно-индуктивной нагрузке определяется рядом безразмерных па-

© А.А. Петков, 2015

параметров  $r_1^* = \frac{R_1}{\sqrt{L_1/C_1}}$ ,  $r_2^* = \frac{R_2}{\sqrt{L_2/C_2}}$ ,  $r_H^* = \frac{R_H}{\sqrt{L_H/C_1}}$  – безразмерные аналоги

активных сопротивлений;  $L_{21}^* = \frac{L_2}{L_1}$ ,  $L_{H1}^* = \frac{L_H}{L_1}$ ,  $C_{21}^* = \frac{C_2}{C_1}$ ,  $U_{21}^* = \frac{U_2}{U_1}$  – без-

размерные аналоги индуктивностей, емкости и зарядного напряжения. При анализе используются также следующие безразмерные параметры:

$\tau^* = \frac{t}{\sqrt{L_1 C_1}}$  – 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 токов;

$J^*(\tau^*) = \int_0^{\tau^*} I^{*2}(\tau^*) d\tau = \frac{j(t)}{C_1 U_1^2} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$  – безразмерный аналог интеграла действия

импульса тока, где  $j(t) = \int_0^t i^2(t) dt$ .

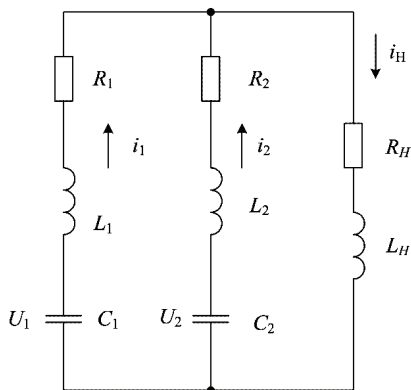


Рисунок 1 – Схема разряда двух ЕНЭ на общую нагрузку:

$U_1, C_1, R_1, L_1$  – 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 также показано, что в зависимости от соотношения параметров схемы возможно формирование пяти характерных видов импульса тока в нагрузке.

В [5] определен вид области монотонности импульса тока. Получено описание границ области. Приведены соотношения, связывающие временные параметры импульса тока и параметры элементов схемы для режимов, соответствующих нижней границе области монотонности.

В работе [6] построены аналитические модели для определения параметров аperiodического импульса тока в нагрузке для области его монотонности в зависимости от параметров элементов разрядной цепи испытательной установки. Такой импульс определяется следующими условиями:  $\frac{di_H}{dt} > 0$  –

при нарастании значений импульса тока;  $\frac{di_H}{dt} = 0$  – в момент достижения максимального значения;  $\frac{di_H}{dt} < 0$  – при спаде значений (см. рис. 2).

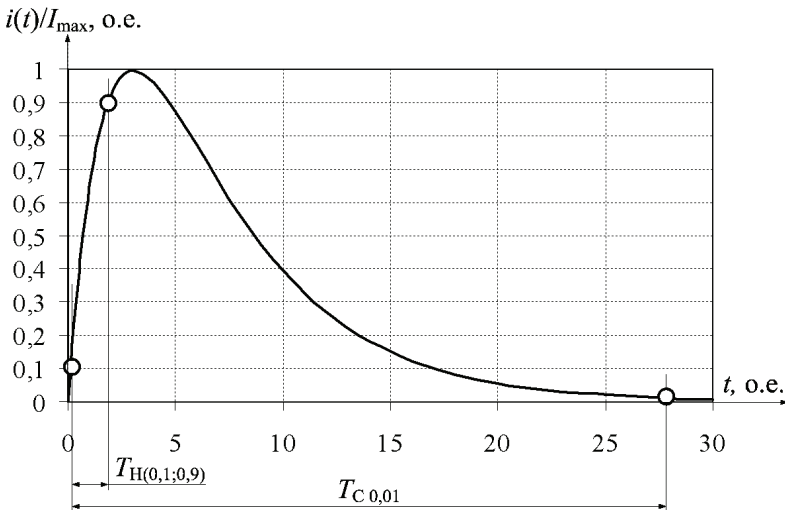


Рисунок 2 – Характерный вид униполярного аperiodического импульса с монотонным нарастанием и спадом значений

В работе получены зависимости для определения временных и амплитудных параметров импульса тока: времени достижения максимального значения, времени достижения на спаде импульса уровня 0,1 от максимального значения, времени достижения на спаде импульса уровня 0,01 от максимального значения и максимального значения тока в нагрузке. Погрешность вычисления по указанным соотношениям не превышает 9 % при:  $r_1^* = 1$ ;  $r_2^* = 0,4 - 0,7$ ;  $r_H^* = 0,5$ ;  $L_{21}^* = 0 - 0,2$ ;  $L_{H1}^* = 3$ ;  $C_{21}^* = 1000$ ;  $U_{21}^* = 0,1$ .

В ряде практических задач, возникает необходимость иметь более точные соотношения для расчета АВП импульса тока (например, при проектировании испытаний с малыми допусками на воздействующие факторы), а также, основанную на них простую методику выбора параметров элементов разрядной цепи.

**Цель работы.** Получение соотношений и разработка методики выбора параметров элементов разрядной цепи испытательного устройства с двумя емкостными накопителями энергии.

**Материалы и результаты исследований.** В результате использования методов планирования экспериментов [7] были получены следующие модели АВП импульса тока и интеграла действия, представленных в безразмерном виде:

$$\frac{\tau_{C0,01}^*}{\tau_{H(0,1,0,9)}^*} = B_0 + B_1 r_2^* + B_2 L_{21}^* + B_{12} r_2^* L_{21}^* + B_{11} r_2^{*2} + B_{22} L_{21}^{*2}, \quad (1)$$

где числовые коэффициенты равны:  $B_0 = 958,5$ ;  $B_1 = 2526,2$ ;  $B_2 = 1197,3$ ;  $B_{12} = -2213,3$ ;  $B_{11} = -387,3$ ;  $B_{22} = 2996,2$ ;

$$\tau_{H(0,1,0,9)}^* = A_0 + A_1 r_2^* + A_2 L_{21}^* + A_{12} r_2^* L_{21}^* + A_{11} r_2^{*2} + A_{22} L_{21}^{*2}, \quad (2)$$

где числовые коэффициенты равны:  $A_0 = 2,46$ ;  $A_1 = -1,25$ ;  $A_2 = -1,2$ ;  $A_{12} = 2,27$ ;  $A_{11} = 0,5$ ;  $A_{22} = -2,53$ ;

$$\tau_{C0,01}^* = D_0 + D_1 r_2^* + D_2 L_{21}^* + D_{12} r_2^* L_{21}^* + D_{11} r_2^{*2} + D_{22} L_{21}^{*2}, \quad (3)$$

где числовые коэффициенты равны:  $D_0 = 2732$ ;  $D_1 = 3134$ ;  $D_2 = 287$ ;  $D_{12} = -200$ ;  $D_{11} = -556$ ;  $D_{22} = -200$ ;

$$I_{H \max}^* = E_0 + E_1 r_2^* + E_2 L_{21}^* + E_{12} r_2^* L_{21}^* + E_{11} r_2^{*2} + E_{22} L_{21}^{*2}, \quad (4)$$

где числовые коэффициенты равны:  $E_0 = 0,0974$ ;  $E_1 = 0,1428$ ;  $E_2 = -0,0495$ ;  $E_{12} = 0,03885$ ;  $E_{11} = -0,04987$ ;  $E_{22} = 0,03455$ ;

$$J_H^* (\tau_{C0,01}^*) = F_0 + F_1 r_2^* + F_2 L_{21}^* + F_{12} r_2^* L_{21}^* + F_{11} r_2^{*2} + F_{22} L_{21}^{*2}, \quad (5)$$

где числовые коэффициенты равны:  $F_0 = 8,788$ ;  $F_1 = -9,506$ ;  $F_2 = -0,0375$ ;  $F_{12} = 0,0167$ ;  $F_{11} = 4,444$ ;  $F_{22} = 0,05$ .

При:  $r_1^* = 1$ ;  $r_2^* = 0,4 - 0,7$ ;  $r_H^* = 0,5$ ;  $L_{21}^* = 0 - 0,2$ ;  $L_{H1}^* = 3$ ;  $C_{21}^* = 1000$ ;  $U_{21}^* = 0,1$  погрешность вычисления по выражениям (1) – (5) не превышает 1 %.

Из (1) видно, что одни и те же значения отношения временных параметров могут быть получены при различных сочетаниях входящих в выражение величин. Это открывает возможности оптимизации параметров схемы, показанной на рис. 1.

Теоретический анализ показывает, что взаимосвязь параметров схемы,

при которой имеет место заданное отношение временных параметров импульса тока  $Y_z$ , определяется следующим образом:

$$r_2^* = -\frac{p}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}, \quad (6)$$

где  $p = \frac{B_1 + B_{12}L_{21}^*}{B_{11}}$ ;  $q = \frac{B_0 - Y_z + B_2L_{21}^* + B_{22}L_{21}^{*2}}{B_{11}}$ .

На рис. 3 показаны линии одинакового отношения временных параметров, определенные с использованием соотношения (6).

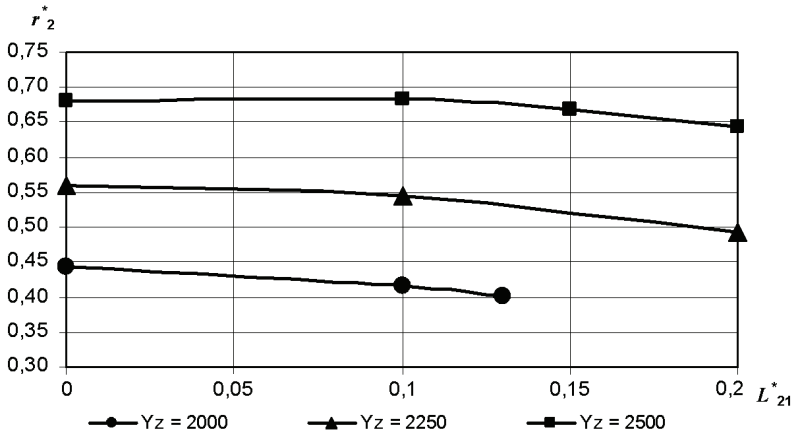


Рисунок 3 – Линии одинакового отношения временных параметров

Как видно из рисунка, двигаясь вдоль линии с требуемым отношением (то есть сохраняя значение отношения) можно выбрать соотношение параметров элементов, наиболее полно удовлетворяющее схемному решению установки.

Используя полученные соотношения, рассмотрим методику выбора параметров элементов схемы, приведенной на рис. 1 при следующих условиях. В нагрузке с параметрами  $R_H = 0,2$  Ом,  $L_H = 5 \cdot 10^{-6}$  Гн требуется сформировать импульс тока с максимальным значением  $i_{H \max} = 1 \cdot 10^4$  А и отношением временных параметров  $Y_Z = T_{C,01}/T_{H(0,1,0,9)} = 2250$ .

Для решения задаемся значениями безразмерных величин  $r_1^* = 1$ ;  $r_H^* = 0,5$ ;  $L_{H1}^* = 3$ ;  $C_{21}^* = 1000$ ;  $U_{21}^* = 0,1$ ;  $L_{21}^* = 0,2$  и по (6) находим  $r_2^* = 0,492$ . Далее, используя соотношения для безразмерных величин, приведенные выше, последовательно находим параметры элементов схемы  $L_1 = 1,67 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $C_1 = 1,04 \cdot 10^{-5}$  Ф,  $R_1 = 0,4$  Ом,  $U_1 = 2,65 \cdot 10^4$  В,  $U_2 = 2,65 \cdot 10^3$  В,

$C_2 = 1,04 \cdot 10^{-2}$  Ф,  $L_2 = 3,33 \cdot 10^{-7}$  Гн,  $R_2 = 0,197$  Ом и расчетные параметры импульса тока  $T_{H(0,1;0,9)} = 7,7 \cdot 10^{-6}$  с,  $T_{C0,01} = 1,74 \cdot 10^{-2}$  с,  $j(T_{C0,01}) = 9,47 \cdot 10^4$  А<sup>2</sup>·с.

В общем случае временные параметры импульса тока могут не соответствовать требуемым значениям. Тогда изменение временных параметров импульса тока (при сохранении их отношения) проводится по материалам работы [8].

Для анализа точности расчетов АВП импульса тока было проведено схемотехническое моделирование переходного процесса (с использованием Micro-Cap 8), которое показало, что относительная погрешность проведенных вычислений не превышает 5 %.

### Выводы

1. Получены модели амплитудно-временных параметров импульса тока в нагрузке, которые обеспечивают расчет с погрешностью не более 1 %.

2. Выведено соотношение, связывающее значения параметров элементов разрядной цепи при фиксированном значении отношения временных параметров импульса тока.

3. Предложена методика определения параметров элементов испытательной схемы с двумя емкостными накопителями энергии.

Материалы статьи могут быть использованы для дальнейших исследований испытательных устройств с несколькими емкостными накопителями 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 НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тем. выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – №4. – С. 37-45. 2. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов / Баранов М.И., Коцушко Г.М., Кравченко В.И. и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 1-5. 3. Повышение надежности работы генератора импульсов тока искусственной молнии / О.С. Недзельский, А.А. Петков, А.В. Плечко, Е.Г. Понуждаева // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – № 2. – С. 50-53. 4. Петков А.А. Разряд двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / А.А. Петков // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ», 2007. – № 34. – С. 79-85. 5. Петков А.А. Формирование импульса тока с монотонным нарастанием и спадом значений при параллельной работе двух емкостных накопителей / А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 3. – С. 65-69. 6. Олейник О. В. Формирование апериодического импульса при разряде двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / О. В. Олейник, А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – № 11. – С. 141-148. 7. 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. 8. Петков А.А. Модификация параметров испытательных устройств при переводе их в новый режим эксплуатации / А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – №6. – С. 63-66.

**Bibliography (transliterated):** 1. Baranov M.I., Ignatenko N.N., Kolobovskiy A.K. Primenenie moschnykh generatorov impulsnykh napryazheniy v sheme s zamykatelem nagruzki dlya polucheniya

bolshih impulsnykh tokov molnii. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskii vyipusk: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2004. No 4. 37-45 Print. **2.** Generator toka iskusstvennoy molnii dlya naturnykh ispytaniy tehnicheskikh ob'ektov. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Pribory i tehnika eksperimenta. 2008. No 3. 1-5 Print. **3.** Povyshenie nadezhnosti raboty generatora impulsov toka iskusstvennoy molnii. O.S. Nedzelskiy, A.A. Petkov, A.V. Plichko, E.G. Ponuzhdaeva. Elektrotehnika i elektromehanika. 2010. No 2. 50-53 Print. **4.** Petkov A.A. Razryad dvuh emkostnykh nakopiteley energii na obschuyu nagruzku. A.A. Petkov. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskii vyipusk: Tehnika i elektrofizika vyisokih napryazheniy. Kharkiv: NTU "KhPI", 2007. No 34. 79-85 Print. **5.** Petkov A.A. Formirovanie impulsa toka s monotonnym narastaniem i spadom znacheniy pri parallelnoy rabote dvuh emkostnykh nakopiteley. A.A. Petkov. Elektrotehnika i elektromehanika. 2009. No 3. 65-69 Print. **6.** Oleynik O. V. Formirovanie aperiodicheskogo impulsa pri razryade dvuh emkostnykh nakopiteley energii na obschuyu nagruzku. O. V. Oleynik, A.A. Petkov. VIsnik NTU "KhPI". Zbirnik naukovih prats. Tematichnyi vipusk: Tehnika i elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "KhPI", 2009. No 11. 141-148 Print. **7.** Egorov A.E., Azarov G.N., Koval A.V. Issledovanie ustroystv i sistem avtomatiki metodom planirovaniya eksperimenta. Pod red. V.G. Voronova. Kharkiv: Vischa shkola. Izd-vo pri Khark. un-te, 1986. 240 Print. **8.** Petkov A.A. Modifikatsiya parametrov ispytatelnykh ustroystv pri perevode ih v novyyi rezhim ekspluatatsii. A.A. Petkov. Elektrotehnika i elektromehanika. 2009. No 6. 63-66 Print.

*Поступила (received) 22.04.2015*

УДК 621.314: 621.391

**В.В. ПИЛИНСКИЙ**, канд. техн. наук, проф. НТУУ «КПИ»;  
**Д.М. ПРОБИТЫЙ**, аспирант НТУУ «КПИ»;  
**А. А. ДОВЖЕНКО**, ассистент НТУУ «КПИ»

## **МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЗВУКОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИМПУЛЬСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ И УСИЛИТЕЛЯМИ КЛАССА D**

Проведен анализ известных методов моделирования помех от блоков звукотехнических систем с ключевыми элементами. Предложен подход к созданию модели в среде открытого программного обеспечения LTSpice с учетом особенностей узлов ключевого типа и эквивалента сети для прогнозирования кондуктивных помех. Проведена оценка характеристик кондуктивных помех при изменении нагрузки на выходе источника вторичного электропитания ключевого типа в режиме Burst Mode. Разработанная модель позволяет оценивать параметры электромагнитной обстановки на этапе проектирования при различных значениях частоты звукового сигнала, нагрузки, видов модуляции усилителя класса D и режимов работы источника вторичного электропитания ключевого типа.

© В.В. Пилинский, Д.М. Пробитый, А. А. Довженко, 2015