

**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  $j(t) = \int_0^t i^2(t) dt$ .

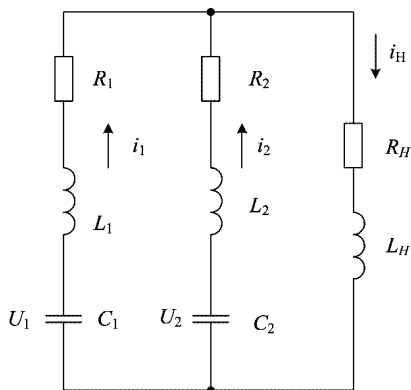


Рисунок 1 – Схема разряда двух ЕНЭ на общую нагрузку:

$U_1, C_1, R_1, L_1$  – 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).

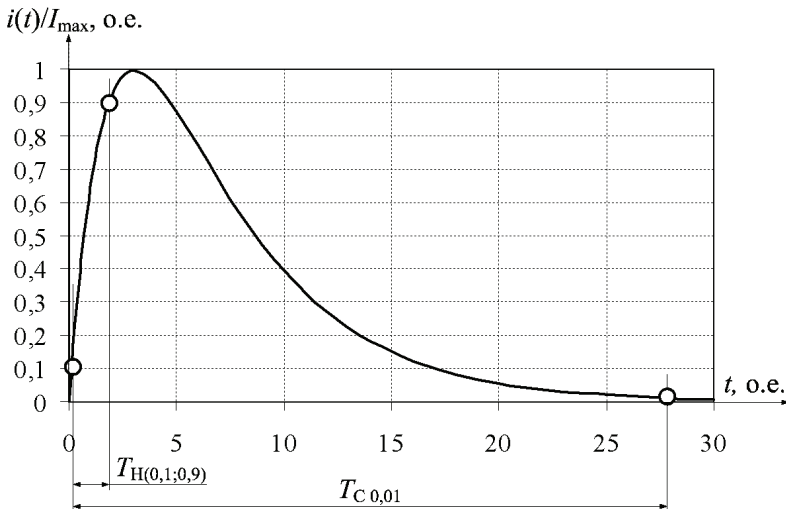


Рисунок 2 – Характерный вид униполярного аperiodического импульса с монотонным нарастанием и спадом значений

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).

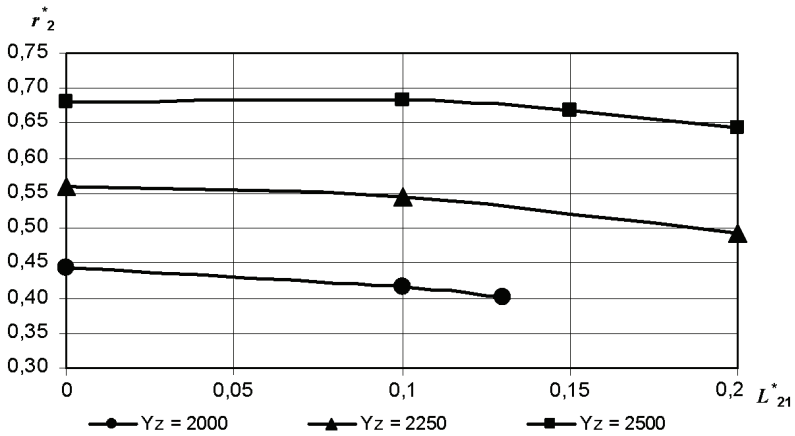


Рисунок 3 – Линии одинакового отношения временных параметров

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  $Y_Z = T_{C,0,1} / T_{H(0,1,0,9)} = 2250$ .

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 tehniceskikh 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 vyipusk: 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

УДК 621.313

**Система двох ЄНЕ для формування випробувальних імпульсів струму з монотонним наростанням і спадом значень / О. О. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 109-115. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.**

У роботі отримані моделі амплітудно-часових параметрів імпульсу струму в навантаженні, виведене співвідношення, яке зв'язує значення параметрів елементів розрядного кола при фіксованому значенні відношення часових параметрів імпульсу струму й запропонована методика визначення параметрів елементів випробувальної схеми із двома ємнісними накопичувачами енергії. Матеріали статті можуть бути використані для подальших досліджень випробувальних пристроїв з кількома ємнісними накопичувачами енергії.

**Ключові слова:** ємнісний накопичувач енергії, імпульс струму, амплітудно-часові параметри.

УДК 621.313

**Система двух ЕНЭ для формирования испытательных импульсов тока с монотонным нарастанием и спадом значений / А. А. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 109-115. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.**

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.

**The system of two ECS for organization of test current pulses with a monotonic rise and fall values / AA Petkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – С. 109-115. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.**

The purpose of this paper is to obtain relations and the development of procedures for the elements selection of the test device, which contains two energy capacitive storage. The analytical methods of data transformation, similarity theory, experimental design and circuit simulation of transients were used in the work for obtaining of the results. The models of amplitude-time parameters of pulse current in the load were obtained in this paper. Shows the dependence of the decay time values divided by the rise time values. Found model to determine the action integral. All models are presented in dimensionless form. The relation that links the parameters of device elements at a fixed ratio of time parameters of the current pulse was deduced. The method for determining of the element parameters of the test circuit was suggested. The article materials may be used for further studies of testing devices which include several energy capacitor storages.

**Keywords:** energy capacitive storage, the current pulse, amplitude and time parameters.