

## ФОРМИРУЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*У роботі визначені області співвідношення параметрів схеми генератора імпульсів магнітного поля, у яких можливе формування трьох характерних форм імпульсів. Отримано співвідношення й запропонована методика для вибору параметрів елементів розрядного кола генератора, при яких формуються уніполярні імпульси з монотонним наростанням і спадом значень.* Бібл. 7, табл. 1, рис. 3.

*Ключові слова:* генератор імпульсів, магнітне поле, форма імпульсу, параметри елементу.

*В работе определены области соотношения параметров схемы генератора импульсов магнитного поля, в которых возможно формирование трех характерных форм импульсов. Получены соотношения и предложена методика для выбора параметров элементов разрядной цепи генератора, при которых формируются уніполярные импульсы с монотонным нарастанием и спадом значений.* Библ. 7, табл. 1, рис. 3.

*Ключевые слова:* генератор импульсов, магнитное поле, форма импульса, параметры элемента.

**Введение. Постановка проблемы.** В настоящее время эксплуатация различных технических средств (ТС) проводится в сложной электромагнитной обстановке, определяемой интенсификацией как природных электромагнитных явлений (в частности – грозовой деятельности), так и процессов, являющихся следствием деятельности человека. Для проверки надежности эксплуатации ТС должны подвергаться испытаниям на стойкость к воздействию соответствующих электромагнитных факторов и, в частности, воздействию импульсов магнитного поля, что, в свою очередь, требует проведения дальнейших исследований, обеспечивающих разработку и создание современного испытательного оборудования.

**Анализ публикаций.** При эксплуатации ТС на них могут воздействовать дестабилизирующие одно- и двух полярные импульсы магнитного поля различной формы [1-3], основными из которых являются: колебательная и аperiodическая. Формальное описание таких импульсов может быть представлено в виде [4] строки-описания формы (СОФ):

$$\text{СОФ} = (A) + (B) + (B), \quad (1)$$

где (A) = {1; 2} – символ, определяющий полярность импульса; (B) = { $k_e$ ;  $\infty$ } – символ, определяющий количество экстремумов,  $k_e \geq 1$ ; (B) = { $k_0$ ;  $\infty$ } – символ, определяющий количество переходов через «0»,  $k_0 \geq 0$ .

По признаку «количество экстремумов» импульс может быть « $k$  – экстремальный» – имеющий точно  $k_e$  – экстремумов (в силу ограниченности импульса во времени он всегда имеет хотя бы один экстремум), и многоэкстремальный – для которого теоретическое количество экстремумов равно  $\infty$  или невозможно однозначно (без указания конкретных значений параметров элементов схемы) определить предельное количество экстремумов в анализируемом интервале времени. По признаку «количество переходов через «0» импульсы можно разделить на « $k$  – переходный» – имеющий точно  $k_0$  – переходов (значение  $k_0 = 0$  соответствует однополярному импульсу) и многопереходный – для которого теоретическое количество переходов через «0» равно  $\infty$  или невозможно однозначно (без указания конкретных значений параметров элементов схемы) определить предельное количество переходов через

«0» в анализируемом интервале времени. Для сопоставления формы импульса с параметрами схемы, при которых имеет место данная форма, используется строка-описание параметров (СОП) [4] в виде наборов: (параметр схемы)  $\in$  (интервал значений).

Для формирования импульсов магнитного поля используются специальные электромагнитные системы, по которым протекают импульсы тока соответствующей формы. В нормативном документе [1] для имитации воздействия импульсов магнитного поля на ТС рекомендуется применять генератор, схема которого показана на рис. 1.

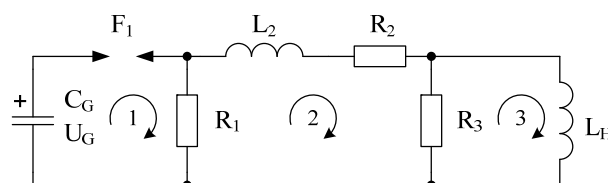


Рис. 1. Схема проведения испытаний

На схеме обозначено:  $U_G$ ,  $C_G$  – напряжение зарядки и емкость генератора,  $F_1$  – коммутатор,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  – формирующие резисторы,  $L_2$  – формирующая индуктивность,  $L_H$  – индуктивность системы полеобразования. Как указано в [1], предложенный генератор обладает широкими возможностями регулирования контролируемых параметров формируемого импульса тока (соответственно параметров импульса магнитного поля). Однако в описании генератора, кроме общих рекомендаций, отсутствуют какие-либо соотношения, позволяющие выбрать формирующих элементов разрядной цепи, что существенно затрудняет процесс его проектирования. В связи с этим в [5] были рассмотрены формирующие возможности генератора при предельных значениях параметров ряда элементов схемы, приведенной на рис. 1. Для более полного использования возможностей данной схемы требуются дополнительные исследования.

**Целью** настоящей статьи является определение областей соотношения параметров элементов разрядной цепи генератора, обеспечивающих формирование импульса магнитного поля различной формы.

**Материалы и результаты исследования.** Предварительный анализ переходных процессов в схеме (рис. 1) показывает, что в индуктивной нагрузке  $L_H$  могут быть сформированы импульсы тока различной формы. На рис. 2 показаны характерные формы импульсов тока: колебательный слабо затухающий (рис. 2,а), колебательный сильно затухающий (рис. 2,б) и униполярный импульс с монотонным нарастанием и спадом значений (рис. 2,в).

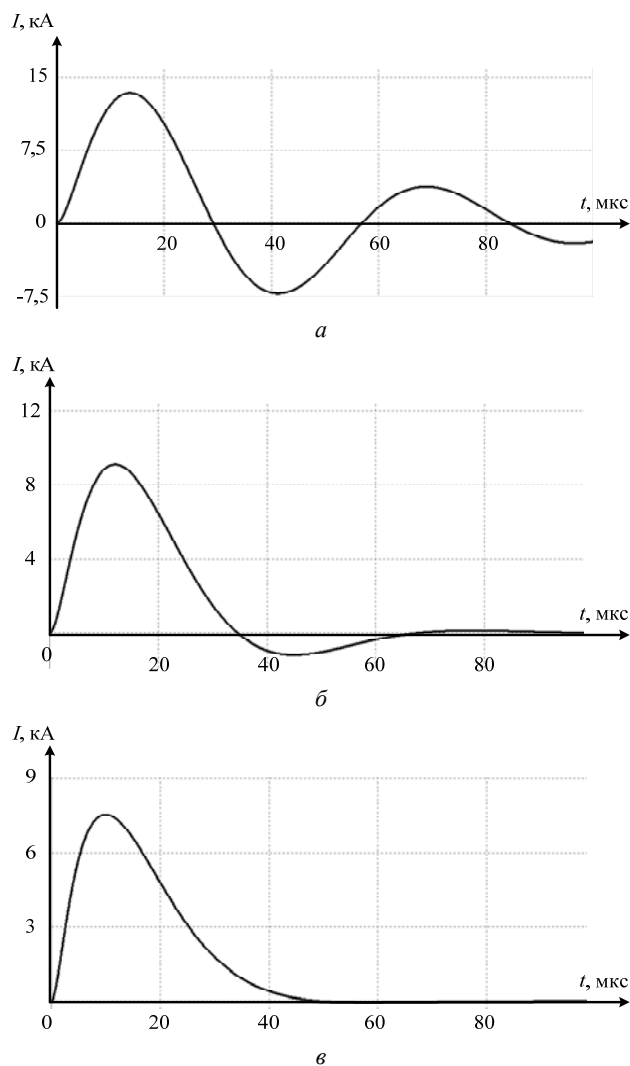


Рис. 2. Характерные импульсы тока

Для определения областей, в которых формируются характерные импульсы тока в системе полеобразования (нагрузке  $L_H$ ), было проведено численное моделирование, базирующееся на использовании безразмерных величин, определяющих переходный процесс [5]:  $\tau = t / \sqrt{L_H C_G}$  – безразмерный аналог времени;  $r_k = R_k / \sqrt{L_H / C_G}$ ,  $k = \overline{1, 3}$  – безразмерные аналогии активных сопротивлений;  $I_J = \frac{i_J}{U_G} \sqrt{\frac{L_H}{C_G}}$ ,  $J = \overline{1, 3}$  – безразмерные аналогии контурных токов;  $L_{2H} = L_2 / L_H$  – безразмерный аналог индуктивности; где  $i_J$  – контурные токи;  $J$  – номер контура (направление обхода контуров показано на рис. 1).

Условия проведения численных экспериментов:

- безразмерное время исследования составляло,  $0 \leq \tau \leq 100$  (данное условие определяется тем, что при  $\tau = 100$  интересующие нас импульсы практически затухнут);

- импульс тока имеет экстремальное значение, если для этого значения выполняются условия наличия экстремума [6] и его абсолютное значение составляет не меньше 1 % от абсолютной величины максимального значения тока (данное условие вытекает из практической нецелесообразности учета малых значений величины магнитного поля при испытаниях);
- импульс тока имеет переход через «0», если за ним имеется экстремальное значение, определенное по правилу предыдущего условия.

Исследования, проведенные при данных условиях, позволили определить области изменения параметров  $L_{2H}$  и  $r_2$  для характерных форм импульсов тока: колебательный слабо затухающий (рис. 3, область 1), колебательный сильно затухающий импульс (рис. 3, область 2) и униполярный импульс с монотонным нарастанием и спадом значений (рис. 3, область 3). Особое внимание при исследовании было уделено формированию униполярного импульса с монотонным нарастанием и спадом значений. На рис. 3 (кривая а) показана взаимосвязь безразмерного аналога индуктивности второго контура  $L_{2H}$  и безразмерного аналога сопротивления  $r_2$ , которая является границей униполярности формируемого импульса.

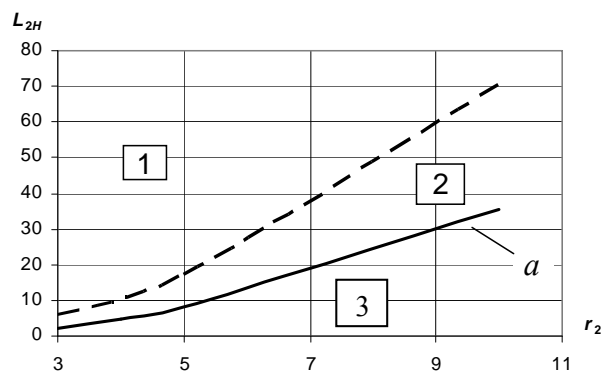


Рис. 3. Разделение областей формирования одно- и двухполярных импульсов тока

В области соотношения параметров, расположенной ниже и правее показанной на рисунке кривой формируется униполярный импульс тока с монотонным нарастанием и спадом значений, выше и левее кривой – двухполярные импульсы тока. Кривая а может быть описана следующим соотношением

$$L_{2H} = 0,3681r_2^2 - 0,0203r_2 - 1,0114, \quad (2)$$

где  $3 \leq r_2 \leq 10$ .

Описание формы импульсов тока в исследованных областях приведено в табл. 1.

В результате исследования получены также следующие соотношения для определения значений безразмерных параметров вдоль кривой (2) (погрешность не более 10%):

$$\tau_{H(0,1;0,9)} = (0,351r_2 + 0,4236)(-0,0549r_3 + 1,1644); \quad (3)$$

$$I_{3\max} = 0,55r_2^{-0,9}(0,024r_3 + 0,92), \quad (4)$$

где  $\tau_{H(0,1; 0,9)}$  – безразмерный аналог длительность нарастания импульса между уровнями 0,9 и 0,1 от максимального значения тока в импульсе;  $I_{3 \max}$  – безразмерный аналог тока в системе полеобразования (третьего контурного тока).

Таблица 1

Номер формы	СОФ импульса тока	Номер СОП	СОП элементов схемы
1	(2) + ( $\infty$ ) + ( $\infty$ )	1.1	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 3; r_3 = 1; L_{2H} > 5,88$
		1.2	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 5; r_3 = 1; L_{2H} > 17,1$
		1.3	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 10; r_3 = 1; L_{2H} > 70,6$
2	(2) + (2) + (1)	2.1	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 3; r_3 = 1; 2,24 < L_{2H} \leq 5,88$
		2.2	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 5; r_3 = 1; 8,09 < L_{2H} \leq 17,1$
		2.3	$r_1 = 1 \cdot 10^6; r_2 = 10; r_3 = 1; 35,6 < L_{2H} \leq 70,6$
3	(1) + (1) + (0)	3.1	$1 \cdot 10^4 \leq r_1 < \infty; r_2 = 3 \dots 10; r_3 = 1 \dots 10; L_{2H} \leq 0,3681r_2^2 - 0,0203r_2 - 1,0114$

Выражения (2) – (4) справедливы при следующих значениях безразмерных параметров:  $r_1 = 1 \cdot 10^4 \dots \infty$ ,  $r_3 = 1 \dots 5$ .

В [1] для униполярного апериодического импульса тока регламентируются следующие временные величины: длительность нарастания импульса между уровнями 0,9 и 0,1 от максимального значения тока в импульсе  $T_{H(0,1; 0,9)} = 6,4$  мкс и длительность импульса по уровню 0,5 от максимального значения тока в импульсе  $T_{I 0,5} = 16$  мкс. Допуск на эти временные параметры составляет 30 %. Тогда отношение временных параметров может изменяться при проведении испытаний в интервале  $T_{I 0,5} / T_{H(0,1; 0,9)} = \tau_{I 0,5} / \tau_{H(0,1; 0,9)} = 1,35 \dots 4,64$  ( $\tau_{I 0,5}$  – безразмерный аналог длительность импульса по уровню 0,5 от максимального значения тока в импульсе).

Анализ показал, что вдоль кривой (2) статистические характеристики отношения временных параметров имеют следующее значение: математическое ожидание  $MO[\tau_{I 0,5} / \tau_{H(0,1; 0,9)}] = 3,4$ ; среднее квадратическое отклонение  $\sigma[\tau_{I 0,5} / \tau_{H(0,1; 0,9)}] = 0,3$ . Следует отметить, что при удалении от кривой (2) в область униполярности, увеличивается отношение  $\tau_{I 0,5} / \tau_{H(0,1; 0,9)}$ . Таким образом, в исследованном диапазоне соотношения параметров генератора могут быть сформированы испытательные импульсы магнитного поля, регламентируемые в [1], а приведенные в работе соотношения позволяют производить выбор параметров испытательной установки.

В качестве примера рассмотрим выбор значений элементов схемы испытательной установки, обеспечивающей протекание в системе полеобразования с индуктивностью  $L_H = 5 \cdot 10^{-6}$  Гн импульса тока с временными параметрами, регламентируемыми [1], и максимальным значением  $i_{3 \max} = 1000$  А.

В начале выбираем значения безразмерных сопротивлений из допустимых интервалов:  $r_1 = 1 \cdot 10^4$ ;  $r_2 = 5$ ;  $r_3 = 2$ . Далее, используя соотношения (2) – (4), вычисляем безразмерные параметры:  $L_{2H} = 8,09$ ;

$\tau_{H(0,1; 0,9)} = 2,3$ ;  $I_3 = 0,125$ . Значения формирующей индуктивности и формирующих сопротивлений вычисляем, используя соотношения для определения их безразмерных аналогов  $L_2 = L_{2H} L_H = 4,04 \cdot 10^{-5}$  Гн;  $R_1 = r_1 (L_H / C_G)^{0,5} = 1,79 \cdot 10^4$  Ом;  $R_2 = r_2 (L_H / C_G)^{0,5} = 8,97$  Ом;  $R_3 = r_3 (L_H / C_G)^{0,5} = 3,59$  Ом. Параметры емкостного накопителя определяем, используя методику выбора параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных устройств, предложенную в [7]:

$$C_G = \frac{1}{L_H} \left( \frac{T_{H(0,1; 0,9)}}{\tau_{H(0,1; 0,9)}} \right)^2 = 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$U_G = L_H \frac{i_{3 \max}}{I_{3 \max}} \frac{\tau_{H(0,1; 0,9)}}{T_{H(0,1; 0,9)}} = 1,44 \cdot 10^4 \text{ В}.$$

Определенные численные значения элементов схемы технически реализуемы. Величины параметры импульса тока, рассчитанные при этих значениях элементов схемы, составляют:  $T_{H(0,1; 0,9)} = 5,88$  мкс,  $T_{I 0,5} = 20$  мкс,  $i_{3 \max} = 1075$  А и не выходят за границы допусков, оговоренных в [1].

#### Выводы.

1. В работе определены области соотношения параметров элементов схемы генератора испытательных импульсов магнитного поля, в которых возможно формирование трех характерных форм импульсов: колебательного слабо затухающего, колебательного сильно затухающего и униполярного импульса с монотонным нарастанием и спадом значений.

2. Получены соотношения и предложена методика для выбора параметров элементов разрядной цепи генератора, при которых формируются униполярные импульсы с монотонным нарастанием и спадом значений.

3. Материалы статьи могут быть использованы для дальнейшего исследования формирующих свойств и оптимизации схемы генератора испытательных импульсов магнитного поля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к импульсному магнитному полю. Технические требования и методы испытаний: ГОСТ 30336-95. – [Действующий от 1995-04-26]. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 12 с. (Межгосударственный стандарт).
2. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
3. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
4. Кравченко В.И., Колиушко Г.М., Петков А.А. Взаимосвязь структуры высоковольтных импульсных устройств и формы генерируемых импульсов // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: междунар. науч. конф., 17-21 августа 2009 г.: тезисы докл. – Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня». – 2009. – С. 119-120.
5. Петков А.А. Генерирование испытательных импульсов магнитного поля // Вісник НТУ «ХПИ». – 2006. – №37. – С. 73-78.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – СПб.: Лань, 2003. – 832 с.

7. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // *Электротехника і електромеханіка*. – 2007. – №6. – С. 70-75.

#### REFERENCES

1. GOST 30336-95. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Ustoichivost' k impul'snomu magnitnomu poliu. Tekhnicheskie trebovaniia i metody ispytaniia* [State Standard 30336-95. Compatibility of technical equipment. Resistance to pulse magnetic field. Technical requirements and test methods]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2001. 12 p. (Rus).
2. Myrova L.O. Chepizhenko A.Z. *Obespechenie stoykosti apparatury svyazi k ioniziruyuschim i elektromagnitnym izlucheniyam* [Ensuring the stability of communications equipment to ionizing and electromagnetic radiation]. Moscow, Radio and communications Publ., 1988. 296 p. (Rus).
3. Kravchenko V.I. *Grozozaschita radioelektronnykh sredstv: Spravochnik* [Lightning protection of radio electronic means: Directory]. Moscow, Radio and communications Publ., 1991. 264 p. (Rus).
4. Kravchenko V.I., Koliushko G.M., Petkov A.A. Interconnection structure of high impulse device and forms generated pulses. *Fizika impulsnykh razryadov v kondensirovannykh sredakh: mezhdunar. nauch. konf., 17-21 avgusta 2009 g.: tezisy dokl.* [Physics of pulsed discharges in condensed media: Intern. scientific. Conf., 17-21 August 2009: Abstracts]. Nikolaev, 2009, pp. 119-120. (Rus).
5. Petkov A.A. The generation of test pulses of magnetic field. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2006, no.37, pp. 73-78. (Rus).
6. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2003. 832 p. (Rus).
7. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test devices with capacitive energy storage. *Elektrotekhnik i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.6, pp. 70-75. (Rus).

*Поступила (received) 16.12.2014*

*Петков Александр Александрович, д.т.н., с.н.с.,  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076678, e-mail: apetkov@yandex.ru*

*A.A. Petkov  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.*

#### **Forming capabilities of a pulse magnetic field generator.**

**Purpose.** *Determination of areas ratio of the parameters of the discharge circuit elements of the generator, which ensure the formation of magnetic field pulses of different shapes.*

**Methodology.** *Numerical simulation using dimensionless variables that determine the nature of the transition process in the discharge circuit of the generator, and use the procedure for determining the pulse points of meeting the conditions of extremum and the transition through zero.* **Results.** *Obtained a description of the formation of the three specific areas of waveforms: oscillatory weakly damped oscillatory strongly damped and unipolar pulse with a monotonic rise and fall values. A relation to the choice of parameters of elements of the discharge circuit of the generator, which formed unipolar pulses with a monotonic rise and fall values.* **Originality.** *A completed and extended database that implements the mapping of the formal description of the pulse shape with a description of areas ratio parameters for high-voltage pulse discharge circuit test units, with respect to the pulses of current flowing in the formation of the magnetic field.* **Practical value.** *The relations obtained allow to select the parameters of the discharge circuit elements of the generator designed to generate test pulses of magnetic field.* References 7, tables 1, figures 3.

**Key words:** *pulses generator, magnetic field, pulse form, element parameters.*