

УДК 621.31

А. А. ПЕТКОВ

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАРАСТАНИЯ ИМПУЛЬСА ТОКА

Встановлено, що верхня оцінка ймовірності безвідмовної роботи генератора імпульсів струму (по параметру час наростання) відповідає варіанту нормального розподілу еквівалентних параметрів розрядного кола, а нижня оцінка – розподілу еквівалентних параметрів розрядного кола за рівномірним законом. Отримано залежності, які дозволяють визначати значення ймовірності безвідмовної роботи у всім діапазоні зміни параметрів елементів розрядного кола для варіанта їхніх відносних відхилень від номінальних значень рівних 10%. Матеріали, представлені в роботі, можуть бути використані для дослідження надійності функціонування генераторів імпульсів струму.

**Ключові слова:** генератор імпульсів струму, час наростання імпульсу, закон розподілу, ймовірність безвідмовної роботи, розрядне коло, імітаційне моделювання.

Установлено, что верхняя оценка вероятности безотказной работы генератора импульсов тока (по параметру время нарастания) соответствует варианту нормального распределения эквивалентных параметров разрядной цепи, а нижняя оценка – распределению эквивалентных параметров разрядной цепи по равномерному закону. Получены зависимости, позволяющие определять значения вероятности безотказной работы во всем диапазоне изменения параметров элементов разрядной цепи для варианта их относительных отклонений от номинальных значений равных 10%. Материалы, представленные в работе, могут быть использованы для исследования надежности функционирования генераторов импульсов тока.

**Ключевые слова:** генератор импульсов тока, время нарастания импульса, закон распределения, вероятность безотказной работы, разрядная цепь, имитационное моделирование.

**Purpose.** Study the impact of the discharge circuit parameters on the distribution of values of the rise time of the pulse current and the probability of failure of the current pulse generator. **Methodology.** Simulation modeling of the distribution of values of the rise time of the current pulse. **Results.** The paper shows the expression that shows the approximate dependence of the rise time of the pulse current for the entire range of variation of the values of the parameters of the circuit elements of the discharge. The error of approximation does not exceed 1%. The influence of the parameters of the discharge circuit in the form of the distribution of values of the rise time of the current pulse. The dependencies to determine the probability of failure-free operation throughout the range of parameters of the discharge circuit elements. **Originality.** The paper investigated the relationship of deviations of parameters of the discharge circuit, the deviation of the current pulse rise time and the probability of failure-free operation of the generator of current pulses. **Practical value.** The results allow to predict the reliability of the current pulse generator.

**Keywords:** current pulse generator, pulse rise time, the law of distribution, the probability of failure-free operation, discharge circuit, simulation.

**Введение.** Испытания технических средств на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов различного происхождения определяют необходимость создания устройств для формирования импульсов тока большой амплитуды и длительности. В практике проведения испытаний для этой цели создаются генераторы импульсов тока (ГИТ) с большой запасаемой энергией, сооружаемые на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Многообразие испытуемых объектов и различные требования к амплитудно-временным параметрам (АВП) формируемых импульсов тока, используемых при испытаниях, вызывают необходимость постоянного совершенствования методов расчета разрядных цепей (РЦ) ГИТ.

**Анализ публикаций.** В РЦ ГИТ, эквивалентная схема которой представима  $RLC$ - контуром (см. рис.1), в зависимости от соотношения параметров контура могут протекать импульсы тока трех видов: аperiodического, критического (предельного аperiodического) и колебательного затухающего [1].

Вне зависимости от формы импульса тока, при испытаниях нормируются его максимальное значение и время нарастания. В общем случае определение указанных параметров производится из решения дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс в  $RLC$ - контуре [1]. Для определения времени нарастания импульса тока используется методика нахождения моментов времени

достижения током уровней, определяющих его нарастание [2]. Для оперативной оценки времени нарастания тока при некоторых соотношениях параметров РЦ ГИТ можно использовать приближенные соотношения [3].

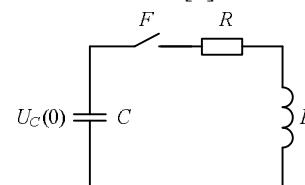


Рис. 1 – Эквивалентная схема РЦ ГИТ:

$U_C(0)$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $R$ , – зарядное напряжение ЕНЭ, емкость батареи ЕНЭ, эквивалентная индуктивность РЦ, эквивалентное активное сопротивление РЦ;  $F$  – коммутатор

При сравнении результатов испытаний, проведенных различными лабораториями, кроме указания номинального значения времени нарастания  $T_H$  регламентируются его допускаемые отклонения [4]  $\delta T_H$ , что отражено в различных нормативных документах, например [5]. Однако в настоящее время данные по определению отклонений времени нарастания не имеют достаточной полноты описания во всем диапазоне изменения параметров испытательных устройств, РЦ которых показана на рис. 1 [6]. Учитывая значительные затраты на подготовку и проведение испытаний, важным является также вопрос надежности формирования испытательных воздействий с заданными

© А.А. Петков. 2016

характеристиками, который в настоящее время рассмотрен при ограниченном соотношении элементов РЦ [7]. Анализ надежности формирования испытательных воздействий связан со статистическим распределением времени нарастания, которое может быть получено при использовании имитационного моделирования [8] и математических методов обработки полученных данных [9, 10].

**Цель работы** – исследование влияния параметров разрядной цепи на характеристики распределения времени нарастания значений импульса тока и вероятность безотказной работы ГИТ по параметрическим отказам.

**Материалы и результаты исследований.** Процедура имитационного моделирования включает в себя многократное вычисление времени нарастания при различных значениях эквивалентных параметров РЦ [8]. Многократное вычисление времени нарастания при любых значениях параметров РЦ удобно производить по обобщенному выражению, полученному с использованием общей методики [2] и соотношений, приведенных в [7]

$$T_{H(0,1,0,9)} = AR^\alpha L^\beta C^\gamma, \quad (1)$$

где  $A$  и  $\alpha$  – коэффициенты, получаемые для нормированного времени нарастания [4, 5];

$$\beta = 0,5(1 - \alpha), \quad \gamma = 0,5(1 + \alpha),$$

$R, L, C$  – эквивалентные параметры РЦ.

Значения коэффициентов, входящих в выражение (1), которые обеспечивают определение времени нарастания с погрешностью не более 1% (время нарастания определяется как разность моментов достижения током уровней 0,9 и 0,1 от максимального значения), приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты обобщенного выражения времени нарастания

$r = R/\sqrt{L/C}$	$A$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
$0 \leq r \leq 0,003$	1,02	0	0,5	0,5
$0,003 \leq r \leq 0,08$	0,974	-0,0085	0,5043	0,4958
$0,08 \leq r \leq 0,2$	0,86	-0,057	0,529	0,472
$0,2 \leq r \leq 0,5$	0,795	-0,112	0,556	0,444
$0,5 \leq r \leq 1$	0,738	-0,219	0,610	0,391
$1 \leq r \leq 2$	0,739	-0,364	0,682	0,318
$2 \leq r \leq 2,5$	0,798	-0,483	0,742	0,259
$2,5 \leq r \leq 4$	0,868	-0,573	0,787	0,214
$4 \leq r \leq 8$	1,083	-0,73	0,865	0,135
$8 \leq r \leq 15$	1,418	-0,86	0,930	0,070
$15 \leq r \leq 60$	1,875	-0,962	0,981	0,019
$60 \leq r \leq \infty$	2,2	-1	1	0

Соотношение (1) позволяет провести имитационное моделирование во всем диапазоне изменения эквивалентных параметров РЦ.

Имитационное моделирование проводилось с использованием специально разработанной программы в среде *Excel* с применением *Visual Basic for Application*, блок-схема которой показана на рис. 2.

Для сопоставления результатов моделирования

диапазон изменения времени нарастания, соответствующий каждому набору номинальных значений эквивалентных параметров РЦ и их относительных отклонений, разбивался на 100 интервалов.

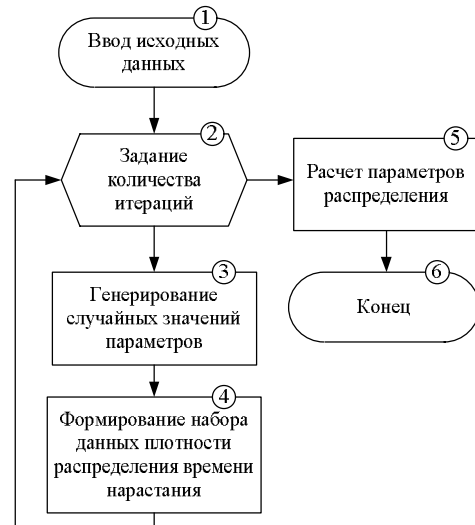


Рис. 2 – Блок-схема программы имитационного моделирования

В процессе моделирования проводился подсчет количества попаданий в каждый интервал. При этом длина каждого интервала составляла  $(T_{Hmax} - T_{Hmin}) / 100$ , где  $T_{Hmax}$  и  $T_{Hmin}$  – наибольшее и наименьшее значение времени нарастания, полученные при значениях эквивалентных параметров элементов РЦ, соответствующих всем возможным комбинациям их отклонений от номинальных величин.

На рис. 3 показаны полигоны относительных частот времени нарастания  $g(T_H)$  при одинаковых относительных отклонениях эквивалентных параметров элементов РЦ. На графике:  $n_{int}$  – номер интервала;  $\delta X = 100(X - X_{nom}) / X_{nom} = \delta R = \delta L = \delta C$ , где  $X_{nom}$  – номинальное значение параметра,  $\delta X$  – относительное отклонение параметра. Графики получены при равномерном распределении эквивалентных параметров элементов РЦ. Для сравнения на рисунке приведено кривую, соответствующую нормальному закону распределения времени нарастания.

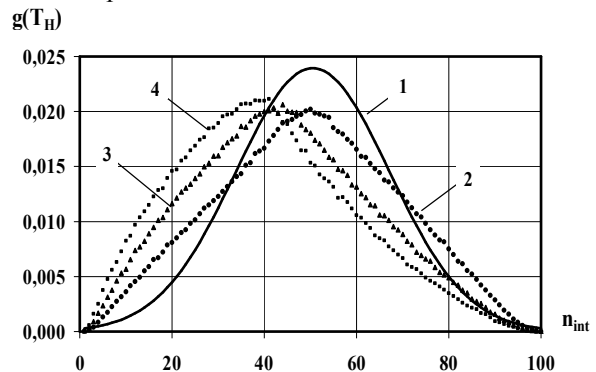


Рис. 3 – Полигон относительных частот времени нарастания при  $r = 8$ :

- 1 – нормальное распределение; 2 –  $\delta X = 5\%$ ;
- 3 –  $\delta X = 20\%$ ; 4 –  $\delta X = 30\%$

Анализ результатов моделирования, показанных на рис. 3, позволяет сделать вывод, что на распределение вероятности времени нарастания существенное влияние оказывает отклонение параметров элементов РЦ от номинального значения. С увеличением относительного отклонения значений эквивалентных параметров элементов РЦ распределение значений времени нарастания все более отклоняется от нормального распределения и принимает все более асимметричную форму.

Графики, показанные на рис. 3, соответствуют идеализированному варианту соотношения относительных отклонений эквивалентных параметров элементов РЦ, который может иметь место в начале эксплуатации ГИТ. Реально, какими бы ни были отклонения в начале эксплуатации, с течением времени они принимают различные значения.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 4, отличие относительных отклонений эквивалентных параметров элементов РЦ оказывает еще большее влияние на форму распределения времени нарастания. Графики, приведенные на рис. 4, также получены при равномерном распределении параметров элементов РЦ.

Равномерное распределение является «наихудшим» вариантом для распределения эквивалентных параметров элементов РЦ.

В общем случае распределения параметров элементов имеют более сложный вид, который может изменяться в процессе эксплуатации ГИТ, и описываются комбинацией нескольких законов распределения.

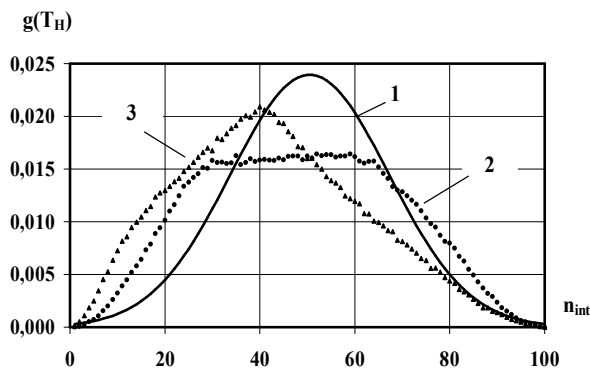


Рис. 4 – Полигон относительных частот времени нарастания при  $r = 3$ :

1 – нормальное распределение; 2 –  $\delta R = 5\%$ ;  $\delta L = 20\%$ ;  $\delta C = 30\%$ ; 3 –  $\delta R = 30\%$ ;  $\delta L = 20\%$ ;  $\delta C = 5\%$

Практически контроль вида распределения в процессе эксплуатации не осуществляется, что приводит к необходимости использования для анализа граничных видов распределений. В качестве «лучшего» варианта распределения эквивалентных параметров элементов РЦ можно принять нормальный закон распределения. Результаты имитационного моделирования при распределении значений эквивалентных параметров элементов РЦ в соответствии с нормальным законом показали, что и в этом случае распределение значений времени

нарастания так же не подчиняется нормальному закону, хотя и обладают определенной симметрией (см. рис. 5).

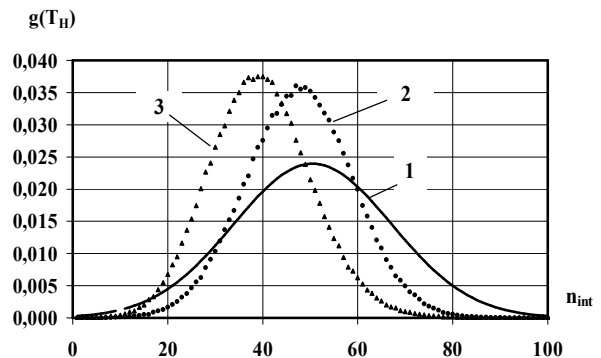


Рис. 5 – Полигон относительных частот времени нарастания при  $r = 8$ :

1 – нормальное распределение; 2 –  $\delta X = 10\%$ ; 3 –  $\delta X = 30\%$

Таким образом, на вид распределения времени нарастания влияет ряд факторов: вид распределения эквивалентных параметров элементов РЦ и их отклонение от номинальных значений, соотношение между значениями отклонений, а также величина параметра  $r$ , характеризующего форму импульса тока, который формируется в РЦ.

Имитационное моделирование, проводимое в нашем случае, позволяет оценить вероятность безотказной работы ГИТ по критерию времени нарастания импульса тока. Для этого зададимся допуском отклонением времени нарастания от его номинального значения и по данным полигона относительных частот определим сумму относительных частот, которые попадают в интервал  $(T_H - \delta T_H, T_H + \delta T_H)$ .

Данная сумма является вероятностью безотказной работы ГИТ по критерию времени нарастания –  $P_{br}$ .

На рис. 6 показаны графики изменения вероятности безотказной работы для варианта  $r = 1$  и  $\delta X = 10\%$  в зависимости от допускаемого отклонения времени нарастания и вида распределения эквивалентных параметров элементов РЦ.

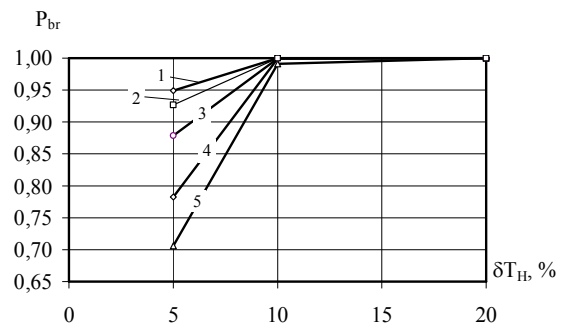


Рис. 6 – Вероятность безотказной работы ГИТ при  $r = 1$

На рисунке показаны графики при следующих данных: 1 – распределение всех параметров элементов подчиняется нормальному закону; 2 – распределение параметра  $R$  подчиняется равномерному закону,  $L$  и  $C$  – нормальному закону; 3 – распределение параметра

$C$  подчиняется равномерному закону,  $L$  и  $R$  – нормальному закону; 4 – распределение параметра  $L$  подчиняется равномерному закону,  $R$  и  $C$  – нормальному закону; 5 – распределение всех параметров элементов подчиняется равномерному закону.

Из рис. 6 видно, что верхняя граница вероятности безотказной работы соответствует варианту, когда все параметры распределены по нормальному закону, а нижняя граница безотказной работы соответствует – варианту, когда все параметры распределены по равномерному закону. Все промежуточные варианты находятся между этими границами. Данный факт позволяет производить оценку вероятности безотказной работы ГИТ по критерию времени нарастания, используя распределение всех параметров по равномерному закону (нижняя граница) и распределение всех параметров по нормальному закону (верхняя граница).

Для оценки вероятности безотказной работы ГИТ по критерию времени нарастания было проведено имитационное моделирование при отклонении эквивалентных параметров элементов РЦ  $\delta X = 10\%$ . Результаты расчетов приведены на рис. 7 (верхняя граница) и рис. 8 (нижняя граница).

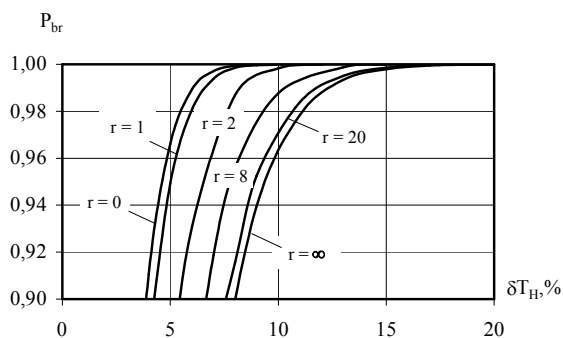


Рис. 7 – Верхняя граница вероятности безотказной работы ГИТ при  $\delta X = 10\%$

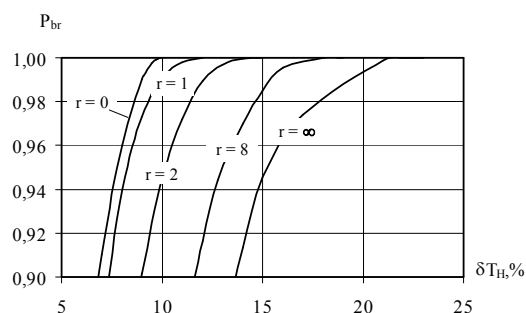


Рис. 8 – Нижняя граница вероятности безотказной работы ГИТ при  $\delta X = 10\%$

Из рис. 7 видно, что при больших допусках на время нарастания  $\delta T_H \geq 15\%$ ) надежную работу ГИТ (вероятность безотказной работы близка к 1) можно обеспечить для любой формы импульса тока.

При малых допусках на время нарастания надежная работа обеспечивается лишь для импульсов тока затухающей колебательной формы и аperiodических импульсов, формируемых в режимах близких к критическому.

Графики, показанные на рис. 8, указывают на то, что нижняя граница вероятности безотказной работы еще более смещена в область больших отклонений времени нарастания.

В процессе эксплуатации ГИТ происходят отказы конденсаторов, а также изменение величины сопротивления резисторов [11], что, в конечном итоге, может привести к ситуации с «худшим» распределением эквивалентных параметров элементов РЦ (приблизению вероятности безотказной работы к нижней границе).

Поэтому для обеспечения надежной работы ответственных испытательных установок, включающих в состав ГИТ, необходимо предусматривать специальные меры, которые позволят определять действительные значения параметров РЦ и, при необходимости, осуществлять их регулирование. Идеальным вариантом является включение в состав ГИТ автоматизированной системы диагностики, определяющей состояния элементов РЦ перед каждым формированием импульса тока.

**Выводы.** 1. Решена задача степенного приближения с погрешностью, не превышающей 1%, зависимости времени нарастания значений импульса тока во всей области изменения величин параметров элементов разрядной цепи генератора импульсов тока.

2. Показано, что на вид распределения времени нарастания влияет ряд факторов: вид распределения эквивалентных параметров элементов разрядной цепи и их отклонение от номинальных значений; соотношение между значениями отклонений, а также величина параметра  $r$ , характеризующего форму импульса тока, который формируется в разрядной цепи.

3. Установлено, что верхняя оценка вероятности безотказной работы генератора импульсов тока (по параметрическим отказам) соответствует варианту нормального распределения эквивалентных параметров разрядной цепи, а нижняя оценка – распределению эквивалентных параметров разрядной цепи по равномерному закону.

4. Получены зависимости, позволяющие определять значения вероятности безотказной работы во всем диапазоне изменения параметра  $r$  для варианта отклонений всех эквивалентных параметров разрядной цепи равном 10%.

Материалы, представленные в работе, могут быть использованы для исследования надежности функционирования генераторов импульсов тока.

**Список литературы**

1. Charles K. Alexander. Fundamentals of Electric Circuits / K. Alexander Charles. – N.Y. : Mcgraw-hill Science/engineering/math, 2001. – 992 p.
2. Петков А. А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы аperiodической формы / А. А. Петков // Электротехника та електроенергетика. – 2005. - №1. – С. 65–69.
3. Петков А. А. Расчет параметрической надежности генератора импульсов тока / А. А. Петков // Электротехника. – 1993. - №5. – С. 69–71.

4. Князев В. В. Оценка неопределенности результатов подтверждения соответствия технических средств требованиям технического регламента Украины по электромагнитной совместимости / В.В. Князев // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2011. – №1(91). – С. 139–142.
5. IEC standard 62305-1, Ed. 1. Protection against lightning – Part 1: General principles. – IEC, 2003. – 61 p.
6. Петров А. А. Расчет допусков разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А. А. Петков // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – №6. – С. 68 – 71.
7. Петков А.А. Статистические характеристики распределения времени нарастания значений импульса тока высоковольтного испытательного устройства / А. А. Петков // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – №1. – С. 62 – 64.
8. Shannon R. E. System Simulation: The Art and Science. / R. E. Shannon. – Englewood, New Jersey : Prentice-Hall Inc., 1975. – 387 p.
9. Korn G. Mathematical handbook for scientists and engineers / G. Korn, T. Korn. – N. Y. : McGraw-Hill Book Company, 1968. – 832 p.
10. Hauschild V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik / V. Hauschild, V. Mosch. – Berlin. : VEB Verlag Technik, 1984. – 312 s.
11. Петков О. О. Розрахунок і проектування резистивно-індуктивних елементів високовольтних імпульсних установок / О. О. Петков. – Х.: Вид-во "Підручник НТУ "ХП", 2014. – 196 с.
3. Petkov A. A. Raschet parametricheskoy nadezhnosti generatora impulsov toka [Calculation of the parametric reliability of the current pulse generator]. *Elektrotehnika*. 1993, no. 5, pp. 69-71.
4. Knyazev V. V. Ocenka neopredelennosti rezultatov podverzhdeniya sootvetstviya tehniceskikh sredstv trebovaniyam tehniceskogo reglamenta Ukrainy po elektromagnitnoy sovmestimosti [Evaluation of uncertainty in the results of conformity assessment of technical equipment of technical regulations in Ukraine requirements of the EMC]. *Sistemi obrobki informacii. Zbirnik naukovih prac Harkivskogo universitetu Povitryanih Sil imeni Ivana Kozheduba* [Information processing systems. Scientific works of Kharkiv Air Force University named after Ivan Kozhedub]. Kharkiv, 2011, no. 1(91), pp. 139–142.
5. IEC standard 62305-1, Ed. 1. Protection against lightning, Part 1. General principles. IEC, 2003. 61 p.
6. Petkov A. A. Raschet dopuskov razryadnyh cepey vysokovoltnykh impulsnykh ispytatelnykh ustroystv [Calculation of tolerances of discharge circuits of high-voltage of pulse test devices]. *Elektrotehnika i elektromehaniika*. 2008, no. 6, pp. 68–71.
7. Petkov A. A. Statisticheskie harakteristiki raspredeleniya vremeni narastaniya znacheniy impulsa toka vysokovoltnogo ispytatelnogo ustroystva [The statistical characteristics of the distribution of the rise time of the current pulse of high-voltage test devices]. *Elektrotehnika i elektromehaniika* [Electrotechnics and electromecanics]. 2009, no. 1, pp. 62–64.
8. Shannon R. E. System Simulation: *The Art and Science*. Englewood, New Jersey, Prentice-Hall Inc., 1975. 387 p.
9. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientists and engineers. N. Y., McGraw-Hill Book Company, 1968. 832 p.
10. Hauschild V., Mosch V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik. Berlin, VEB Verlag Technik, 1984. 312 p.
11. Petkov O. O. *Rozrahunok i proektuvannya rezistivno-induktivnykh elementiv visokovoltnih impulsnih ustanovok : navch. posib* [Calculation and design of resistive and inductive elements of the high-voltage pulse devices]. Kharkov, Pidruchnik NTU "HPI", 2014. 196 p.

## References (transliterated)

1. Charles K. Alexander. *Fundamentals of Electric Circuits*. N.Y., Mcgraw-hill Science/engineering/math, 2001. 992 p.
2. Petkov A. A. Raschet parametrov razryadnoy cipi vysokovoltnykh impulsnykh ispytatelnykh ustroystv, formiruyuschih impulsy aperiodicheskoy formy [Calculation of the parameters of the discharge circuit of high-voltage pulse test devices of forming aperiodic pulses form]. *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2005. no. 1, pp. 65-69.

Поступила (received) 04.02.2016

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Имитационное моделирование распределения времени нарастания импульса тока / О. О. Петков // Вісник НТУ «ХП».** Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 11 (1183). – С. 15–19. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2409-9295..

**Имитационное моделирование распределения времени нарастания импульса тока / А. А. Петков // Вісник НТУ «ХП».** Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 11 (1183). – С. 15–19. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2409-9295.

**Simulation of the distribution of the current pulse rise time / А. А. Petkov // Bulletin of NTU "KhPI".** Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 11 (1183). – P. 15–19. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2409-9295.

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Петков Олександр Олександрович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри «Інженерна електрофізика», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (067) 572–00–58; e-mail: apetkov@yandex.ua.

**Петков Александр Александрович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Инженерная электрофизика», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (067) 572–00–58; e-mail: apetkov@yandex.ua.

**Petkov Alexander Alexandrovich** – Doctor of technical sciences, Senior researcher, Professor of the Department "Engineering Electrophysics", National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"; tel.: (067) 572–00–58; e-mail: apetkov@yandex.ua.