

**Михайленко Владислав Володимирович**, канд. тех. наук, доцент;  
Тел. +38 (044) 2 36 79 89; E-mail: VladislavMihailenko@i.ua  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37. Київ, Україна, 03056

### МЕТОД БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ КОМУТАТОРАМИ

Однією з найбільш складних задач при аналізі розгалужених електричних кіл з комутаторами є задача дослідження перехідних процесів в таких колах при використанні високочастотного перемикання. Запропоновано математичну модель для аналізу перехідних процесів в напівпровідникових перетворювачах установок електроімпульсної обробки різних середовищ. Наведено графіки, що відображають перехідні процеси у електричних колах. Запропоновано спрощений аналіз розрахунку електромагнітних процесів в таких колах за рахунок використання методу багатопараметричних модулюючих функцій та спеціалізованого програмного пакету MATHCAD. Обґрунтовано доцільним використання проміжних напівпровідникових перетворювачів (НПП) частоти для зменшення модуляції напруги ФРІ. Показано, що такий підхід по суті використовує багаторазове перетворення змінної напруги у постійну і навпаки, що вимагає використання методів швидкої оцінки стану напівпровідникових комутаторів (ключів) і аналізу режимів, які виникають у ланках НПП. Наведено аналіз використання методу багатопараметричних функцій з використанням пакету MATHCAD для аналізу перехідних процесів в розрядно-імпульсних системах з високочастотними напівпровідниковими комутаторами та обґрунтовано доцільність його використання. Представлено результати дослідження для визначення параметрів системи перетворення частоти мм генератора, які забезпечують мінімум дисперсії фази коливань вихідного сигналу. Запропоновано метод зменшення нестабільності режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

**Ключові слова:** перехідні процеси, напівпровідникові комутатори.

**Михайленко Владислав Володимирович**, канд. тех. наук, доцент;  
Тел. +38 (044) 2 36 79 89 ; E-mail: VladislavMihailenko@i.ua  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Победы, 37. Киев, Украина, 03056

### МЕТОД МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ КОММУТАТОРАМИ

Одной из самых сложных задач при анализе разветвленных электрических цепей с коммутаторами является задача исследования переходных процессов в таких цепях при использовании высокочастотного переключения. Предложена математическая модель для анализа переходных процессов в полупроводниковых преобразователях установок электроимпульсной обработки различных сред. Приведены графики, отражающие переходные процессы в электрических цепях. Предложен упрощенный анализ расчета электромагнитных процессов в таких цепях за счет использования метода многопараметрических модулирующих функций и специализированного программного пакета MATHCAD. Обосновано целесообразным использование промежуточных полупроводниковых преобразователей (ППП) частоты для уменьшения модуляции напряжения ФРИ. Показано, что такой подход по сути использует многократное преобразование переменного напряжения в постоянное и наоборот, что требует использования методов быстрой оценки состояния полупроводниковых коммутаторов (ключей) и анализа режимов, возникающих в звеньях ППП. Приведены результаты анализа использования метода многопараметрических функций с использованием пакета MATHCAD для переходных процессов в разрядно-импульсных системах с высокочастотными полупроводниковыми коммутаторами и обоснована целесообразность его использования. Представлены результаты исследования для определения параметров системы преобразования частоты мм генератора, которые обеспечивают минимум дисперсии фазы колебаний выходного сигнала. Предложен метод уменьшения нестабильности режимов в технологических нагрузках и режимов потребления электроэнергии от сети электропитания.

**Ключевые слова:** переходные процессы, полупроводниковые коммутаторы.

**Mikhailenko Vladislav Volodimirovich**, candidate of technical Science, Associate Professor;  
Tel +38 (044) 2 36 79 89; E-mail: VladislavMihailenko@i.ua  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute of the Institute of Igor Sikorsky», Peremogi Avenue, 37. Kyiv, Ukraine, 03056

#### METHOD MANY-PARAMETRIC FUNCTIONS FOR ANALYSIS OF THE CONNECTING PROCESSES IN ELECTRIC CIRCUIT WITH SEMICONDUCTOR COMMUTATORS

*One of the most challenging tasks in analyzing rozgaluzhenih electric power with switches is the task to complete the transition process in such stake with vikoristanny high-frequency remix. A mathematical model has been invoked for the analysis of the transition processes in the on-demand transfer of installations of the electrical pulse processing of the open mediums. Indicated graphs, scho vidobrazuyayut pereh\_dni processes in electric kolakh. The protests of the analysis of the electromagnet processes in such cola for the round wrap of the method of bagoparametric modular functions and the special MATHCAD software package are spread. Primed by the major industrial and industrial frequency retarder (NPP) frequency for the change of the FRI modulus. It is shown that such a piddid by the day of Victorian Bagatorov's overtake of the most varied tasks at the post office and at the same time, the methods of the quick assessment of the public relations (key mode). An analysis is made of the method of bagoparametric functions for the Victoria MATHCAD package for the analysis of intermittent processes in discharge-pulse systems with high-frequency voltage switches that are primed with the highest frequency. The results of accession for the visualization of the system and frequency conversion of the mm generator are presented, as well as the minimum dispersion phase of the output signal is secured. The method of changing the uninterrupted mode of operation is monitored.*

**Key words:** connecting processes, semiconductor commutators.

#### Вступ

Однією з найбільш складних задач при аналізі розгалужених електричних кіл з комутаторами є задача дослідження перехідних процесів в таких колах при використанні високочастотного перемикачів [1, 3]. У зв'язку з можливістю виникнення в них критичних електричних режимів доцільним є використання спеціалізованих математичних моделей.

Аналіз розрахунку електромагнітних процесів в таких колах можна спростити за рахунок використання методу багатопараметричних модулюючих функцій [2, 4] та спеціалізованого програмного пакету MATHCAD.

При електромагнітних процесів в електричних колах тиристорних формувачів постійної напруги (ФПН) та формувачів розрядних імпульсів (ФРІ) електрична нестабільність параметрів ФРІ збільшується при зростанні їх частоти розрядних імпульсів. Оскільки частота розрядних імпульсів у декілька разів перевищує частоту мережі електроживлення, стає доцільним використання проміжних напівпровідникових перетворювачів (НПП) частоти для зменшення модуляції напруги ФРІ.

Такий підхід по суті використовує багаторазове перетворення змінної напруги у постійну і навпаки, що вимагає використання методів швидкої оцінки стану напівпровідникових комутаторів (ключів) і аналізу режимів, які виникають у ланках НПП. Тому метою роботи є використання методу багатопараметричних функцій з використанням пакету MATHCAD для аналізу перехідних процесів в електричних колах з високочастотними напівпровідниковими комутаторами.

#### Аналіз перехідних процесів в розрядно-імпульсних системах

В роботі була розроблена математична модель для аналізу перехідних процесів в НПП установок електроімпульсної обробки різних середовищ.

На функціональній схемі такого перетворювача, приведеної на рис. 1, позначено:

СМ – силовий модулятор,

ВЧВ – однофазний високочастотний випрямляч вихідної напруги СМ,

$H$  – активно-індуктивне навантаження,  $VS_1$  та  $VS_2$  – зарядний та розрядний тиристорні ключі, які працюють по чергову,

$CY$  – система управління,  $L_0, L_1$  – індуктивності,  $R_{L_0}, R_{L_1}$  – активні опори котушок  $L_0$  і  $L_1$  відповідно;  $C_0, C_1$  – ємності конденсаторів.

Вихідну напругу  $u_d(t)$  на виході ВЧВ запишемо співвідношенням виду

$$u_d(t) = u_M(t)\psi_1(t)\psi_2(t)\psi_3(t), \quad (1)$$

де:

- $u_M(t) = U_{dm} \sin(\omega_1 t + \varphi)$  – напруга мережі живлення;
- $U_{dm} = 220\sqrt{2}$  В – максимальне значення напруги живлення;
- $\varphi$  – початкова фаза напруги  $u_M(t)$ ;
- $\omega_1$  – кругова частота;
- $\psi_1(t)$  і  $\psi_2(t)$  – комутуючі функції, які відображають роботу випрямляча і інвертора СМ;
- $\psi_3(t)$  – комутуюча функція, яка відображає роботу ВЧВ;
- $\alpha(t)$  – кут управління.

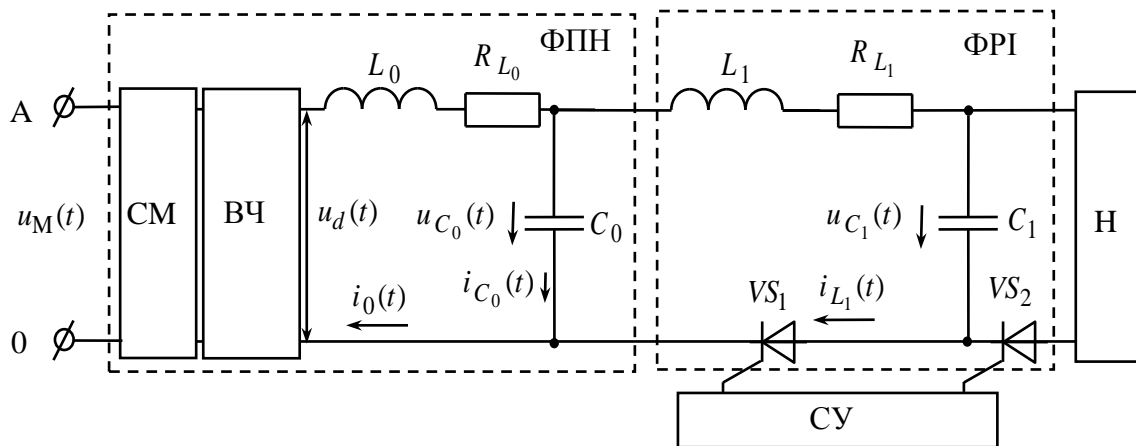


Рис. 1

Зробимо припущення, що індуктивність  $L_0$  та активний опір  $R_{L_0}$  дорівнюють нулю і розглянемо роботу контуру  $C_0, L_1, R_{L_1}, C_1, VS_1$ :

На інтервалі часу  $t_{п1} = 0 \dots t_{к1} = t_1 = 0,0004$ с напругу  $u_{C_{01}}(t)$  на  $C_0$  визначаємо з диференціального рівняння виду

$$\frac{d^2 u_{C_{01}}(t)}{dt^2} = \frac{-R_{L_1} du_{C_{01}}(t)}{L_1 dt} - \frac{(C_1 + C_0) u_{C_{01}}(t)}{L_1 C_0 C_1} + \frac{U_{dm}}{L_1 C_1}, \quad (2)$$

де:

- $L_1$  – індуктивність фільтру;
- $R_{L_1}$  – активний опір котушки  $L_1$ ;
- $C_0, C_1$  – ємності конденсаторів.

Рішення (2) визначимо за допомогою методу Рунге-Кутта на часовому інтервалі  $t_{п1} = 0 \dots t_{к1}$  у вигляді матриці  $U_{C_{01}}$  миттєвих значень напруги  $u_{C_{01}}(t)$  та їхніх похідних, розрахованих з вибраним кроком  $P_1$

$$U_{C_{01}} = \text{rkfixed}(u_{C_{01}}, t_{п1}, t_{к1}, P_1, D_{C_{01}}), \quad (3)$$

де:

- $D_{C_{01}}$  – вектор-стовпець проміжних рішень відносно напруги  $u_{C_{01}}(t)$  на конденсаторі  $C_0$ .

Далі проводимо уточнення значення напруги  $u_{C_{01}}(t)$  знайденої в рівнянні (3) на інтервалі  $t_{п1} = 0 \dots t_{к1}$  порівнюючи її з випрямленою напругою  $u_d(t)$ :

$$u'_{C_{01}}(t) = \text{if}(t < t_1 = 0,0004 \text{ с}, \text{if}(u_{C_{01}}(t) < u_d(t), u_d(t), u_{C_{01}}(t)), 0) \quad (4)$$

Оскільки на інтервалі  $t_{п2} = t_1 = 0,0004 \text{ с} \dots t_{к2} = t_2 = 0,005 \text{ с}$  тиристор  $VS_1$  закритий, то напругу  $u_{C_{02}}(t)$  на  $C_0$  на цьому інтервалі визначаємо з виразу виду

$$u_{C_{02}}(t) = \text{if}(t < t_1 = 0,0004 \text{ с}, 0, \text{if}(t \leq t_2 = 0,005 \text{ с}, \text{if}(u'_{C_{01}}(t_1) < u_d(t_1), u_d(t_1), u'_{C_{01}}(t_1)), 0)) \quad (5)$$

Аналогічно знаходимо напруги  $u'_{C_{03}}(t)$  і  $u_{C_{04}}(t)$  на інтервалах  $t_{п3} = t_2 = 0,005 \text{ с} \dots t_{к3} = t_3 = 0,0054 \text{ с}$  і  $t_{п4} = t_3 = 0,0054 \text{ с} \dots t_{к4} = t_4 = 0,01 \text{ с}$  відповідно.

Тоді сумарну напругу  $u_{C_0}(t)$  на  $C_0$  за один період зміни напруги живлення  $u_M(t)$  знаходимо підсумовуючи напруги знайдені у виразах (4) і (5) та напруги  $u'_{C_{03}}(t)$  і  $u_{C_{04}}(t)$

$$u_{C_0}(t) = u'_{C_{01}}(t) + u_{C_{02}}(t) + u'_{C_{03}}(t) + u_{C_{04}}(t) \quad (6)$$

Знайдемо напругу на конденсаторі  $C_1$ . На інтервалі  $t_{п1} = 0 \dots t_{к1} = t_1 = 0,0004 \text{ с}$  напругу  $u_{C_{11}}(t)$  на конденсаторі  $C_1$  визначаємо з рівняння виду

$$\frac{d^2 u_{C_{11}}(t)}{dt^2} = \frac{-R_{e1} du_{C_{11}}(t)}{L_1 dt} - \frac{(C_0 + C_1 u_{11}(t)) u_{C_{11}}(t)}{L_1 C_1 C_0} + \frac{u_1(t)}{L_1 C_1}, + \quad (7)$$

де:

- $u_1(t) = \text{if}(u_{C_{01}}(t) < u_d(t), u_d(t), U_{dm})$  та  $u_{11}(t) = \text{if}(u_{C_{01}}(t) < u_d(t), 0, 1)$  – еквівалентні напруги, які залежить від співвідношення напруг  $u_{C_{01}}(t)$  та  $u_d(t)$ ;
- $R_{e1} = \text{if}(u_{C_{01}}(t) < u_d(t), 0, R_{L1})$  – еквівалентний сумарний опір на інтервалі часу  $t_{п1} \dots t_{к1}$ .

Рішення (7) визначимо на інтервалі  $t_{п1} \dots t_{к1}$  у вигляді матриці  $U_{C_{11}}$  миттєвих значень напруги  $u_{C_{11}}(t)$  на  $C_1$  та їхніх похідних, розрахованих з вибраним кроком  $p_1$ , як

$$U_{C_{11}} = \text{rkfixed}(u_{C_{11}}, t_{п1}, t_{к1}, p_1, D_{C_{11}}), \quad (8)$$

де:

- $D_{C_{11}}$  – вектор-стовпець проміжних рішень відносно напруги  $u_{C_{11}}(t)$  на конденсаторі  $C_1$ .

На інтервалі  $t_{п2} = t_1 = 0,0004\text{с} \dots t_{к2} = t_2 = 0,005\text{с}$  тиристор  $VS_1$  закритий, а тиристор  $VS_2$  відкритий і тоді напругу  $u_{C_{12}}(t)$  на  $C_1$  на інтервалі визначили з рівняння

$$\frac{d^2 u_{C_{12}}(t)}{dt^2} = \frac{-R_H du_{C_{12}}(t)}{L_H dt} - \frac{u_{C_{12}}(t)}{L_H C_1}, \quad (9)$$

де:

- $L_H, R_H$  – індуктивність навантаження і активний опір кола навантаження.

Рішення (9) визначимо на інтервалі  $t_{п2} \dots t_{к2}$  у вигляді матриці  $U_{C_{12}}$  миттєвих значень напруги  $u_{C_{12}}(t)$  та їхніх похідних, розрахованих з вибраним кроком  $p_2$

$$U_{C_{12}} = \text{rkfixed}(u_{C_{12}}, t_{п2}, t_{к2}, p_2, D_{C_{12}}), \quad (10)$$

де:

- $D_{C_{12}}$  – вектор-стовпець проміжних рішень відносно напруги  $u_{C_{12}}(t)$  на  $C_1$ .

Аналогічно знаходимо напруги  $u_{C_{13}}(t)$  і  $u_{C_{14}}(t)$  на інтервалах  $t_{п3} = t_2 = 0,005\text{с} \dots t_{к3} = t_3 = 0,0054\text{с}$  і  $t_{п4} = t_3 = 0,0054\text{с} \dots t_{к4} = t_4 = 0,01\text{с}$  відповідно.

Тоді сумарну напругу  $u_{C_1}(t)$  на  $C_1$  за один період зміни напруги живлення  $u_M(t)$  знаходимо підсумовуючи напруги знайдені у виразах (8) і (10) та напруги  $u_{C_{13}}(t)$  і  $u_{C_{14}}(t)$

$$u_{C_1}(t) = u_{C_{11}}(t) + u_{C_{12}}(t) + u_{C_{13}}(t) + u_{C_{14}}(t). \quad (11)$$

Струм  $i_{L_1}(t)$  знаходимо шляхом диференціювання напруги  $u_{C_1}(t)$ , знайденої з рівняння (11)

$$i_{L_1}(t) = \text{if} \left( \frac{du_{C_1}(t)}{dt} > 0, C_1 \frac{du_{C_1}(t)}{dt}, 0 \right) \quad (12)$$

Струм  $i_{C_0}(t)$  який протікає через конденсатор  $C_0$  знаходимо шляхом диференціювання напруги  $u_{C_0}(t)$ , знайденої з рівняння (6), з виразу виду

$$i_{C_0}(t) = C_0 \frac{du_{C_0}(t)}{dt} \quad (13)$$

Струм  $i_0(t)$  через індуктивність  $L_0$  знаходимо підсумовуючи вирази (12) та (13)

$$i_0(t) = i_{L_1}(t) + i_{C_0}(t) \quad (14)$$

Діаграми напруг  $u_{C_0}(t)$  на  $C_0$  і  $u_{C_1}(t)$  на  $C_1$  та струмів  $i_{L_1}(t)$  і  $i_0(t)$  з  $C_0 = 2200 \mu\text{Ф}$ ,  $C_1 = 100 \mu\text{Ф}$ ,  $R_H = 3 \text{ Ом}$  та  $R_{L_1} = 0,05 \text{ Ом}$ , для мережі електроживлення частотою  $f_M = 50 \text{ Гц}$ , напругою  $U_{M\text{max}} = 311 \text{ В}$  при  $L_1 = 162 \mu\text{Гн}$  та  $L_H = 1 \mu\text{Гн}$ , при частоті високочастотних імпульсів  $f_{\text{IM}} = 5000 \text{ Гц}$ , показані на рис. 2.

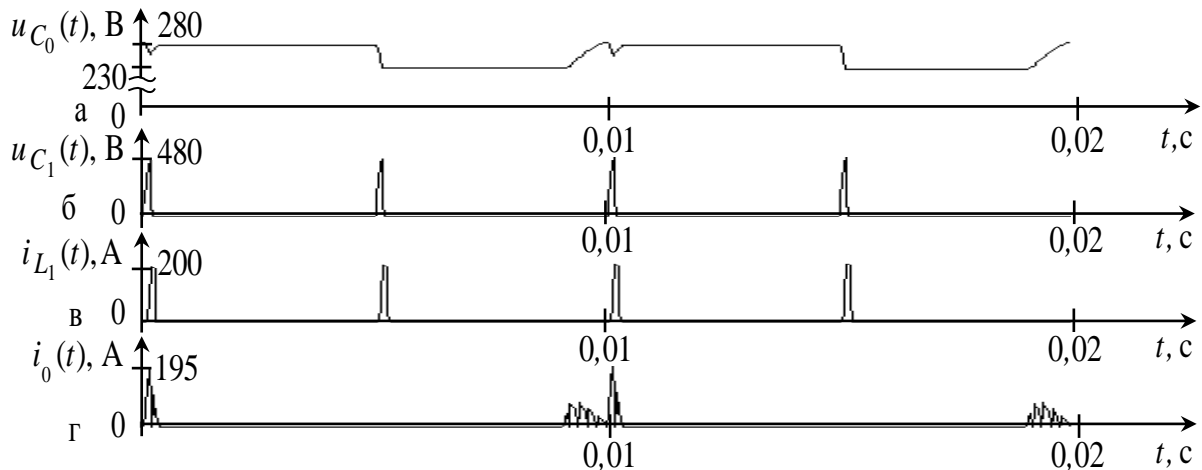


Рис. 2

З діаграм видно, що використання програмного пакету MATHCAD забезпечує аналіз перехідних та усталених режимів в зарядно-розрядних колах НПП електроімпульсних установок.

Підвищення частоти високочастотних імпульсів модулюючого впливу  $\psi_2(t)$  на інверторі СМ зменшує нестабільність параметрів розрядних імпульсів ФРІ при тих же величинах  $L_1$ ,  $C_0$  та  $C_1$ .

Збільшення величини ємності  $C_1$  та частоти її зарядно-розрядних циклів призводить до підвищення нестабільності параметрів розрядних імпульсів в навантаженні та збільшує нестабільність режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення. Збільшення величини ємності  $\tilde{N}_0$  зменшує нестабільність параметрів розрядних імпульсів, але підвищує нестабільність режимів споживання електроенергії від мережі живлення.

### Висновки

1. Обґрунтовано доцільність використання програмного пакету MATHCAD для аналізу перехідних процесів та оптимізації параметрів НПП в яких виникають процеси зарядки і розрядки ємнісного накопичувача електроенергії зі змінними початковими умовами. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.
2. Показано, що доцільним є використання високочастотного модулюючого впливу  $\psi_2(t)$  на інвертор СМ. Це забезпечує зменшення нестабільності вихідної напруги ФПН і відповідно напруги розрядних імпульсів ФПН.

### Список використаної літератури:

1. Лившиц А. Л., Отто М. А. Импульсная Электротехника. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.
2. Макаренко М. П., Михайленко В. В. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачах з багатозонним регулюванням вихідної напруги функціями багатопараметричного виду // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність – Тематичний випуск. – 2002. – Ч.1. – С.19–22.
3. Щерба А. А. Тиристорные схемы электропитания технологических установок с параметрической стабилизацией выходных характеристик // В сборнике “Преобразование и стабилизация параметров электрической энергии”. Киев: Институт электродинамики АН Украины, 1996. – С. 18–27.
4. Щерба А. А., Михайленко В. В., Захарченко С. М. Математичне моделювання перехідних процесів в напівпровідникових перетворювачах параметрів електроенергії розрядно-імпульсних електротехнологічних систем // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. – Тематичний випуск. – 2008. – Ч.3. – С.19–24.

### Referenses:

1. Livshic A. L., Otto M. A. Pulsed Elektrotehnika. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 352 p. (Rus.)
2. Makarenko M.P., Mihaylenko V.V. The Analysis of the electromagnetic processes in converter with much zoned regulations of the output voltage function multivariable type// Technicheskaiia elektrodinamika. Silova elektronika i energoefektivnist - Thematic vypusk. – 2002. – Part 1. – P. 19–22 (Ukr.)
3. Scherba A.A. The Thyristor schemes of the power supply of the technological installation with parametric stabilization of the output features // In collection "Transformation and stabilization parameter to electric energy". The Kiev: Institute of Electrodynamics Academy of Science of Ukraine, 1996. – P. 18–27 (Rus.)
4. Scherba A. A., Mihaylenko V. V., Zaharchenko S. M. Mathematical modeling of the connecting processes in semiconductor parameter of the electric energy is discharged pulsed electro technological systems // Technicheskaiia elektrodinamika. Silova elektronika i energoefektivnist - Thematic vypusk. – 2008. – Part 3. – P. 19–24 (Ukr.)

Прийнята до друку 24.12. 2019