

УДК 621.3.011.74.005

**Щерба Анатолий Анатолий Андрійович**, д-р техн. наук, член-кор. Академії Наук України  
**Михайленко Владислав Володимирович**, канд. техн. наук  
 Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна,  
 e-mail: [VladislavMihailenko@i.ua](mailto:VladislavMihailenko@i.ua).

### АНАЛИЗ ЕЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОЛАХ НАПІВПРОВІДНИХ ФОРМУВАЧІВ РОЗРЯДНИХ ІМПУЛЬСІВ МЕТОДОМ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ

*У цій статті проведено аналіз електроімпульсних процесів в електричних колах напівпровідниковими з комутаторами. Створено математичну модель для аналізу перехідних процесів в напівпровідникових перетворювачах установок електроімпульсної обробки різних середовищ. Наведено графіки, що відображають перехідні процеси у електричних колах.*

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

**Щерба Анатолий Андреевич**, д-р техн. наук, член-корр. Академии Наук Украины  
**Михайленко Владислав Владимирович**, канд. техн. наук  
 Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина,  
 e-mail: [VladislavMihailenko@i.ua](mailto:VladislavMihailenko@i.ua).

### АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ МЕТОДОМ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

*В этой статье проведено анализ электроимпульсных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создана математическая модель для анализа переходных процессов в полупроводниковых преобразователях установок электроимпульсной обработки разных сред. Приведены графики, которые показывают переходные процессы в электрических цепях.*

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

**Scherba Anatoliy Andreevich**, Dr. Eng. Sc., member-corresponded to academies of the sciences of the Ukraine,  
**Mihaylenko Vladislav Vladimirovich**, PhD in Technical Sciences  
 National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, e-mail:  
[VladislavMihailenko@i.ua](mailto:VladislavMihailenko@i.ua)

### ANALYSIS OF THE ELECTROIPULISNYE PROCESSES IN CIRCUIT OF THE SEMICONDUCTOR SHAPERS CHARGES PULSE BY METHOD MULTIVARIABLE FUNCTION

*Analysis of the electroipulisnye processes is organized. In this article in electric circuit with semiconductor commutators. Mathematical model is created for analysis of the connecting processes in semiconductor converter of the installing the electropulsed processing the different ambiances. The Brought graphs, which show the connecting processes in electric circuit. In work is also executed development of the method multivariable modulating function for simplification of the analysis of the connecting processes in electric circuit of the semiconductor shapers radio-frequency class pulse. Use the method muchparametric inflexion functions, which marketed package in прикладном MathCAD, simplifies the analysis of the connecting processes and execution to optimization parameter semiconductor converters, in electric circuit which appear the processes of the charge and category of the capacitive drive to electric powers with variable initial condition. Such approach allows also to do instability mode less in technological load and mode of the consumption to electric powers from network of the energy consumption.*

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

#### Вступ

При аналізі розгалужених електричних кіл напівпровідникових формувачів регульованих розрядних імпульсів однією з найбільш складних є задача дослідження перехідних процесів при високочастотному перемиканні [1-10]. У зв'язку з неможливістю досліджувати в колах таких формувачів критичні електроенергетичні режими виникає потреба використовувати для цього спеціалізовані математичні моделі. Аналіз розрахунку електромагнітних процесів в таких колах можна спростити за рахунок використання методу багатопараметричних модулюючих функцій, та спеціалізованому програмному пакеті

MATCAD [11].

При зростанні частоти розрядних імпульсів на виході напівпровідникових формувачів постійної напруги (ФПН) та формувачів розрядних імпульсів (ФРІ) нестабільність електромагнітних процесів в колах перетворювачів і параметрів на виході ФРІ збільшується. Оскільки частота розрядних імпульсів у декілька разів перевищує частоту мережі електроживлення, то виникає доцільність використання проміжних високочастотних 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.

**Метою роботи** є розвиток методу багатопараметричних функцій для спрощення аналізу перехідних процесів в електричних колах напівпровідникових формувачів високочастотних розрядних імпульсів.

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

В роботі було розроблено математичну модель для аналізу перехідних процесів в НПП установах електроімпульсної обробки різних середовищ. На функціональній схемі такого перетворювача, приведеній на рис. 1, позначено: *СМ* – силовий модулятор, *ВЧВ* – однофазний високочастотний випрямляч вихідної напруги *СМ*, *VS<sub>1</sub>* та *VS<sub>2</sub>* – зарядний та розрядний тиристорні ключі, які працюють по чергово, *СК* – система керування, *L<sub>1</sub>* і *L<sub>2</sub>* – індуктивності, *R<sub>L1</sub>* і *R<sub>L2</sub>* – активні опори котушок *L<sub>1</sub>* і *L<sub>2</sub>* відповідно; *R<sub>0</sub>* і *R<sub>H</sub>* – активні опори кола на виході ВЧВ та навантаження; *C<sub>0</sub>*, *C<sub>1</sub>* – ємності конденсаторів.

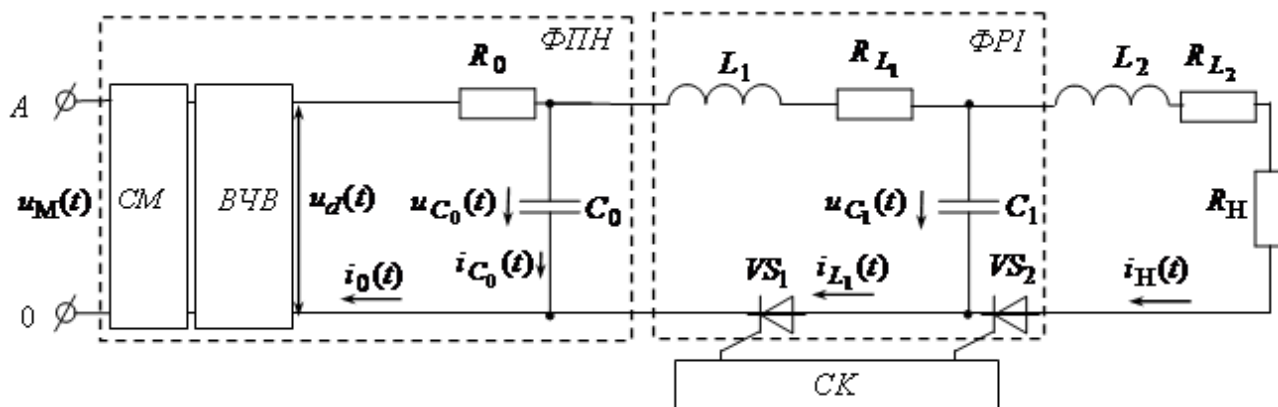


Рис. 1. Функціональна схема перетворювача

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

$$u_d(t) = u_M(t)\psi_1(t)\psi_2(t)\psi_3(t), \tag{1}$$

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.

Зробимо припущення, що активний опір  $R_0$  дорівнюють нулю і розглянемо роботу контуру  $C_0, L_1, R_{L1}, C_1, VS_1$ : На інтервалі часу  $t_0 = 0 \dots t_1 = 0,0004$ с напругу  $u_{C_0}(t)$  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) було визначено за допомогою методу Рунге-Кутта на часовому інтервалі  $t_0 = 0 \dots t_1$  у вигляді матриці  $U_{C_{01}}$  миттєвих значень напруги  $u_{C_{01}}(t)$  та їхніх похідних, розрахованих з вибраним кроком  $p_1$

$$U_{C_{01}} = \text{rkfixed}(u_{C_{01}}, t_0, t_1, p_1, D_{C_{01}}), \quad (3)$$

де  $D_{C_{01}}$  – вектор-стовпець проміжних рішень відносно напруги  $u_{C_{01}}(t)$  на конденсаторі  $C_0$ ,  $\text{rkfixed}$  – математична функція MathCAD.

Далі проводилось уточнення значення напруги  $u_{C_{01}}(t)$ , яка попередньо знаходилась з рівняння (3) на інтервалі  $t_0 = 0 \dots t_1$ , 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  $t_1 = 0,0004 \text{ с} \dots t_2 = 0,005 \text{ с}$  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 було знайдено напруги  $u'_{C_{03}}(t)$  і  $u_{C_{04}}(t)$  на інтервалах  $t_2 = 0,005 \text{ с} \dots t_3 = 0,0054 \text{ с}$  і  $t_3 = 0,0054 \text{ с} \dots t_4 = 0,01 \text{ с}$  відповідно.

Сумарна напруга  $u_{C_0}(t)$  на  $C_0$  за один період зміни напруги живлення  $u_M(t)$  була знайдена, як сума напруги, отриманої за виразами (4) і (5), та функцій  $u'_{C_{03}}(t)$  і  $u_{C_{04}}(t)$ . Було отримано вираз:

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

Напругу на конденсаторі  $C_1$  знаходили на інтервалі  $t_0 = 0 \dots t_1 = 0,0004 \text{ с}$ , а напругу  $u_{C_{11}}(t)$  на конденсаторі  $C_1$  визначали з рівняння виду:

$$\frac{d^2 u_{C_{11}}(t)}{dt^2} = \frac{-R_{e_1} du_{C_{11}}(t)}{L_1 dt} - \frac{(C_0 + C_1 u_{11}(t)) u_{C_{11}}(t)}{L_1 C_1 C_0} + \frac{u_1(t)}{L_1 C_1}, \quad (7)$$

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  $u_d(t)$ ;  $R_{e_1} = \text{if}(u_{C_{01}}(t) < u_d(t), 0, R_{L_1})$  –

еквівалентний сумарний опір на інтервалі часу  $t_0 \dots t_1$ .

Рішення (7) знаходилось на інтервалі  $t_0 \dots t_1$  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

$$U_{C_{11}} = \text{rkfixed}(u_{C_{11}}, t_0, t_1, p_1, D_{C_{11}}), \quad (8)$$

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

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

$$\frac{d^2 u_{C_{12}}(t)}{dt^2} = \frac{-(R_{L_2} + R_H) du_{C_{12}}(t)}{L_2 dt} - \frac{u_{C_{12}}(t)}{L_2 C_1}, \quad (9)$$

де  $L_2, R_{L_2}, R_H$  – індуктивність в колі навантаження, її активний опір і активний опір кола навантаження.

Рішення (9) було визначено на інтервалі  $t_1 \dots t_2$  у вигляді матриці  $U_{C_{12}}$  миттєвих значень напруги  $u_{C_{12}}(t)$  та їхніх похідних, розрахованих з вибраним кроком  $p_2$ ,

$$U_{C_{12}} = \text{rkfixed}(u_{C_{12}}, t_1, t_2, p_2, D_{C_{12}}), \quad (10)$$

де  $D_{C_{12}}$  – вектор-стовпець проміжних рішень відносно напруги  $u_{C_{12}}(t)$  на  $\tilde{N}_1$ .

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

Тоді сумарну напругу  $u_{C_1}(t)$  на  $C_1$  за один період зміни напруги живлення  $u_M(t)$  було знайдено, як сума напруг, знайдені з виразів (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  $i_{L_1}(t)$  знаходився шляхом диференціювання напруги  $u_{C_1}(t)$ , отриманої з рівняння (11)

$$i_H(t) = \text{if} \left( \frac{du_{C_1}(t)}{dt} < 0, -C_1 \frac{du_{C_1}(t)}{dt}, 0 \right). \quad (12)$$

Діаграми напруг  $u_{C_0}(t)$  на  $C_0$  і  $u_{C_1}(t)$  на  $C_1$  та струму  $i_H(t)$  з  $C_0 = 2200 \text{ мкФ}$ ,  $C_1 = 20 \text{ мкФ}$ ,  $R_H = 0,4 \text{ Ом}$ ,  $R_{L_1} = 0,05 \text{ Ом}$  та  $R_{L_2} = 0,01 \text{ Ом}$ , для мережі електроживлення частотою  $f_M = 50 \text{ Гц}$ , напругою  $U_{M\text{max}} = 311 \text{ В}$  при  $L_1 = 162 \text{ мкГн}$  та  $L_2 = 2 \text{ мкГн}$  і  $L_2 = 9 \text{ мкГн}$ , при частоті високочастотних імпульсів  $f_{IM} = 5000 \text{ Гц}$ , показані на рис. 2 і рис. 3 відповідно.

З отриманих діаграм видно, що використання програмного пакету MathCAD дозволяє аналізувати перехідні та усталені режими в зарядно-розрядних колах НПП електроімпульсних установок. Підвищення частоти високочастотних імпульсів модулюючого впливу  $\psi_2(t)$  на інверторі  $CM$  зменшує нестабільність параметрів розрядних імпульсів  $\Phi PI$  при тих же величинах  $L_1$ ,  $C_0$  та  $C_1$ .

Аналіз також показує, що 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  $C_0$  навпаки: зменшує нестабільність параметрів розрядних імпульсів, але підвищує нестабільність режимів споживання електроенергії від мережі живлення.

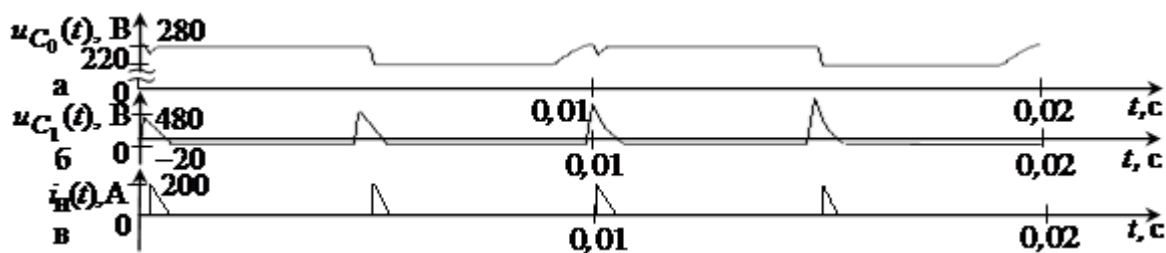


Рис. 2. Діаграми напруг  $u_{C_0}(t)$  і  $u_{C_1}(t)$  та струму  $i_H(t)$  при  $L_2 = 2$  мкГн

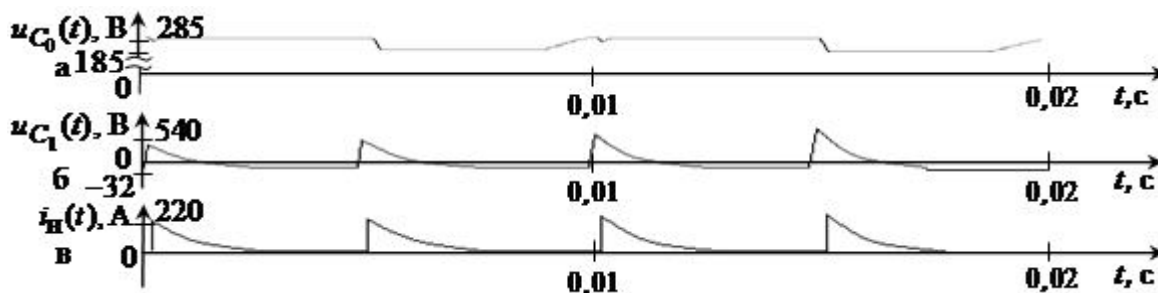


Рис. 3. Діаграми напруг  $u_{C_0}(t)$  і  $u_{C_1}(t)$  та струму  $i_H(t)$  при  $L_2 = 9$  мкГн

### Висновки

1. Використання методу багатопараметричних модулюючих функцій, який реалізований у прикладному пакеті MathCAD, спрощує аналіз перехідних процесів та виконання оптимізації параметрів НПП, в електричних колах яких виникають процеси зарядки і розрядки ємнісного накопичувача електроенергії зі змінними початковими умовами. Такий підхід дозволяє також 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  $CM$ . Це забезпечує зменшення нестабільності вихідної напруги  $\Phi ПН$  і відповідно напруги розрядних імпульсів  $\Phi ПН$ .

### Список використаної літератури

1. Макаренко М. П. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу / М. П. Макаренко, В. І. Сенько, М. М. Юрченко – Київ.: НАН України, ІЕД, 2005. – 241 с.

2. Михайленко В. В. Зменшення нестабільності параметрів напівпровідникових формувачів розрядних імпульсів у високочастотних електротехнологічних системах шляхом зменшення паузи між включенням перезарядного та зарядного тиристорів / В. В. Михайленко, А. А. Щерба, О. О. Фаріна // Київ.: Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2012. – Ч.3. – С. 55–60.



3. Михайленко В. В. Метод багатопараметричних функцій для аналізу перехідних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами / В. В. Михайленко // Харьков.: Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Специальный выпуск. – 2013. – Т. 2, № 8 (114). – С. 56 – 60.
4. Щерба А. А. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями электроэнергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов / А. А. Щерба, Н. И. Супруновская // Київ.: Технічна електродинаміка.– 2014. – № 1. – С. 3–11.
5. Shakweh Y. Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drives applications / Y. Shakweh, E. A. Lewis // Proc. IEEE-PESC'99 Conf. – 1999. – P. 590–595.
6. Wheeler P. W. The Technology and Potential of Matrix Converters / P. W. Wheeler, J. C. Clare, L. Empringham, M. Bland // Power Electronics Europe. – 2001, № 5. – P. 25–28.
7. Gyugyi L. Static Power Frequency Changers / L. Gyugyi, B. R. Pelly – New York, NY: Wiley. – 1976. – 442 p.
8. Sinha G. A four level inverter based drive with a passive front end / G. Sinha, T.A. Lipo // Proc. IEEE-PESC'99 Conf. – 1999. – P. 590–595.
9. Pena R. A doubly-fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine / Pena R., Clare J. C., Asher G. M. // Proc. IEE. – 1996. – Part B, Vol. 143, № 5. – P. 380–387.
10. Holmer L. Analysis, design and implementation of the space-vector modular for forced-commutated cycloconverters / L. Holmer, D. Borojevic // IEE Proceedings-B. – 1992, – Vol. 139, № 2. – P. 103–113.
11. Дьяконов В. MathCAD 8/2000: специальный справочник / В Дьяконов – Санкт-Петербург.: Питер, 2000. – 592 с.

#### References

1. Makarenko, M. P., Senko, V. I., Yurchenko, M. M. (2005), System analysis of the electromagnetic processes in semiconductor converter of the electric powers inflexion type [Sistemnyy analiz elektromagnitnykh procesiv u napivprovodnykovykh peretvoruvachah electroenergii modulaciynogo typu], *National academy of the sciences of the Ukraine, Institute of electrodinamiks, Publ.*, Kyiv, Ukraine, 241 p.
2. Mihaylenko, V. V. Scherba, A. A., Farina, O. O. (2012), Reduction to instability parameter semiconductor shapers class pulse in radio-frequency electro technological system by reduction of the pause between of cut-in fart charge and charge thyristors [Zmenshenja nestabilnosti parametriv napivprovodnycovykh formuvachiv rozrjadnykh impulsiv u vysocochastotnykh electrotehnologichnykh systemah shljahom zmenshenja pauzy misg vcluchenjam perezarjadnogo ta zaradnogo tyrystoriv], *Technicheskaia electrodinamika. Silova elektronika i energoefektivnist. Thematic vypusk. Publ.*, Kyiv, Ukraine, Part 3, P. 55–60.
3. Mihaylenko, V. V (2013), Method multivariable function for analysis of the connecting processes in electric circuit with semiconductor commutator [Method bagatoparametrychnykh funciiy dlja analizu perehidnykh procesiv v electrychnykh colah z napivprovodnycovymy comutatoramy], *Energoberezhenie. Energy. Energoaudit. Special issue.*, Kyiv, Ukraine, Vol 2, № 8 (114), P. 56–60.
4. Scherba, A. A, Suprunovsaya, N. I. (2014), Syntheses of the electric circuits with capacitive drive of the electric powers in semiconductor shaper powerful class pulse [Sintes electricheskih cepey s emcostnymi nacopiteljami electroenergii v poluprovodnicovykh formirovateljah moschnykh razrjadnykh impulsiv], *Technicheskaia electrodinamika, Publ.*, Kyiv, Ukraine, № 1, P. 3–11.
5. Shakweh, Y., Lewis, E.A. (1999), “Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drives applications”, *Proc. IEEE-PESC'99 Conf. Publ.*, London, England, P.590–595.
6. Wheeler, P. W., Clare, J. C., Empringham L., Bland M. (2001), “The Technology and Potential of Matrix Converters”, *Power Electronics Europe Publ.*, London, England, № 5, P. 25–28.
7. Gyugyi, L., Pelly, B. R. (1976), *Static Power Frequency Changers, NY. Wiley, New York*, 442 p.
8. Sinha, G. A, Lipo, T. A. (1999), “A four level inverter based drive with a passive front end”, *Proc. IEEE-PESC'99 Conf.*, P.590–595.
9. Pena, R., Clare, J. C., Asher, G. M. (1996), “A doubly-fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine”, *Proc. IEE., Part B, Vol. 143, № 5*, P. 380–387.
10. Holmer, L., Borojevic, B. D. (1992), “Analysis, design and implementation of the space-vector modular for forced-commutated cycloconverterlmer”, *IEE Proceedings, Vol. 139, № 2*, P.103–113.
11. Dyaconov, V. (2000), *MathCAD 8/2000: special reference book [MathCAD 8/2000: specialniy spravochnic]*, Peter, Saint-Petersburg, Russia, 592 p.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.