

## ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ДЕВ'ЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ НА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

**В.І. Сенько**<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, **В.В. Михайленко**<sup>1\*\*</sup>, канд. техн. наук.,  
**С.С. Розіскулов**<sup>2\*\*\*</sup>, **С.О. Бур'ян**<sup>1\*\*\*\*</sup>, **Ю.М. Чуняк**<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

<sup>2</sup> – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [VladislavMihailenko@i.ua](mailto:VladislavMihailenko@i.ua)

*Виконано моделювання та аналіз усталених і перехідних процесів у трифазних електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами, що використовують дев'ятизонне регулювання напруги на електротехнологічному навантаженні, представленому активно-індуктивним опором. Моделювання проведено з використанням методу багатопараметричних функцій, що дозволило спростити складання алгоритмічних рівнянь для аналізу електромагнітних процесів у перетворювачах, в електричних колах яких може бути більше двох незалежних реактивних елементів. Без урахування втрат електроенергії в напівпровідникових комутаторах перетворювачів показано особливості використання фазних напруг мережі електроживлення для реалізації дев'ятизонного регулювання їхньої вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають особливості регулювання такої напруги на електротехнологічному навантаженні. Бібл. 10, рис. 3.*

**Ключові слова:** вихідні напруга та струм, метод багатопараметричних модулюючих функцій.

**Вступ.** Під час регулювання вихідних характеристик електроімпульсних установок [1, 2] зазвичай використовують змінення ємності накопичувальних конденсаторів їхніх електро-розрядних установок [2, 3]. Для реалізації енергоефективних режимів у нелінійному навантаженні [4] такий підхід вимагає врахування умов перерозподілу електроенергії між різними конденсаторами [3, 5], що обмежує його використання. Моделювання та аналіз режимів електромеханічних [6] і електротермічних [7] установок обґрунтувало доцільність використання зонного способу перетворення параметрів електромагнітної енергії трифазної мережі електроживлення [6, 8] з використанням структур напівпровідникових перетворювачів (НПП) частоти [9].

Розвиток елементної бази НПП у напрямку підвищення швидкодії дозволив створювати в перетворювальних установках ланки з частотою перемикання вентилів значно більшою, ніж частота змінення напруги промислової мережі електроживлення [6, 9, 10]. У роботі [8] для аналізу таких процесів у колах напівпровідникових перетворювачів із сімнадцятизонним широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) вихідної напруги було розроблено спеціальні імітаційні моделі. Проте в [6] показано, що мінімізацію вищих гармонічних складових у вихідній напрузі напівпровідникових перетворювачів найпростіше реалізовувати за умови, коли кількість зон керування кратна трьом для кожної з фаз мережі електроживлення. У разі підключення високочастотних НПП до трифазної мережі найбільш простим випадком є дев'ятизонне ШІР, за якого випрямлений струм у лінійному активно-індуктивному навантаженні теж буде мати менші високочастотні періодичні пульсації, ніж за сімнадцятизонного регулювання, представленого в роботі [8].

**Метою роботи** було виявлення особливостей реалізації електромагнітних процесів у електричних колах напівпровідникових перетворювачів з дев'ятизонним регулюванням напруги на навантаженні.

---

© В.І. Сенько, В.В. Михайленко, С.С. Розіскулов, С.О. Бур'ян, Ю.М. Чуняк, 2019

ORCID ID: \* <http://orcid.org/000000162330361>; \*\* <http://orcid.org/0000-0003-2793-8966>;

\*\*\* <http://orcid.org/0000-0001-9234-7324>; \*\*\*\* <http://orcid.org/0000-0002-4947-0201>;

\*\*\*\*\* <http://orcid.org/0000-0002-4506-9124>

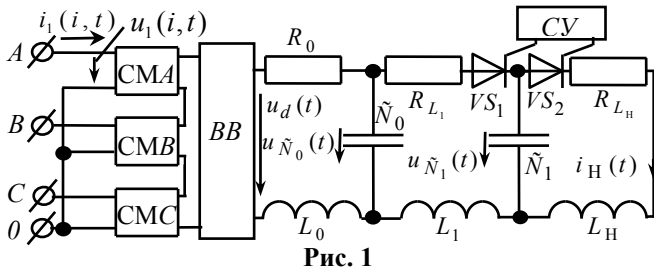


Рис. 1

На рис. 1 показано структурну схему відповідного НПП, на якій позначено: СМА, СМВ і СМС – силові модулятори (СМ) фазних напруг  $A$ ,  $B$  і  $C$ ;  $BB$  – високочастотний випрямляч. Вказані модулятори підключені до мережі паралельно, а їх виходи з'єднані послідовно, причому кожен з них є ланкою високої

частоти і має в своєму складі випрямляч, високочастотний інвертор випрямленої напруги (ІВН) та узгоджуючий трансформатор.

Під час розробки математичної моделі високовочастотного напівпровідникового перетворювача використовувався метод багатопараметричних модулюючих функцій [6, 8]. Приймались припущення, що вхідна мережа є симетричною, її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди ІВН є ідеальними ключами, трансформатори не мають втрат, а навантаження має активно-індуктивний характер.

Використовувався зонний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії трифазної мережі електроживлення, за якого в силових модуляторах здійснювалась модуляція миттєвих значень попередньо випрямлених фазних синусоїдальних напруг  $u_1(i,t)$  з частотою  $\omega_1$  і відповідними еквівалентними модулюючими впливами  $\psi(\alpha_p, t)$  з частотою  $\omega_2$ . Такий підхід дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електричної мережі, в результаті якого на вході  $BB$  формується промодульована напруга [6].

Аналіз електромагнітних процесів у НПП з багатозонним ШІР вихідної напруги і електротехнологічним навантаженням виконувався з урахуванням таких ознак системного підходу до аналізу, як цілісність та вплив зовнішніх і внутрішніх факторів [6]. У разі дев'ятизонного регулювання напруга на виході  $BB$  має вигляд:

$$u_d(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{n=1}^{N=9} \sum_{i=1}^3 u_1(i,t) \Psi_B(i,t) \Psi(n,N,t) \Psi_{BB}(t), \quad (1)$$

де  $u_1(i,t)$  – миттєві значення фазних напруг мережі;  $\Psi_B(i,t)$  – функції, що співпадають за часом з положенням відповідних фазних напруг;  $n = 1, 2, \dots, N = 9$  – номери зон регулювання;  $\Psi(n, N, t)$  – множина модулюючих впливів  $i$ -х інверторів  $CM$ ;  $\Psi_{BB}(i,t)$  – функція, що модулює еквівалентний вплив  $BB$ ;  $k_T$  – коефіцієнт трансформації.

Зроблено припущення, що індуктивність  $L_0$  та активний опір  $R_{L_0}$  дорівнюють нулю, і розглянуто роботу контуру  $C_0, R_{L_1}, VS_1, C_1, L_1, C_0$ . На інтервалі часу  $t_{\hat{1}} = 0 \dots t_{\hat{1}} = t_1$  напругу  $u_{C_{01}}(t)$  на  $\tilde{N}_0$  визначено як

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

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

Рішення (2) визначено із застосуванням методу Рунге-Кутта на часовому інтервалі  $t_{\hat{1}} = 0 \dots t_{\hat{1}} = t_1$  у вигляді матриці  $U_{C_{01}}$  миттєвих значень напруги  $u_{C_{01}}(t)$  та їхніх похідних, розрахованих з вибраним кроком  $p_1$

$$U_{C_{01}} = \text{rkfixed}(u_{C_{01}}, t_{\hat{1}}, t_{\hat{1}}, p_1, D_{C_{01}}), \quad (3)$$

де  $D_{C_{01}}$  – вектор-стовпець проміжних рішень відносно напруги  $u_{C_{01}}(t)$  на конденсаторі  $\tilde{N}_0$ .

На інтервалі  $t_{\hat{2}} = t_1 \dots t_{\hat{2}} = t_2$  тиристор  $VS_1$  – закритий, а напругу  $u_{C_{02}}(t)$  на цьому інтервалі визначено як

$$u_{C_{02}}(t) = \text{if}(t < t_1, 0, \text{if}(t \leq t_2, u_d(t_1), 0)). \quad (4)$$

Аналогічно знайдено напруги на інших інтервалах і сумарну напругу  $u_{C_0}(t)$  за період зміни напруги  $u_d(t)$ :

$$u_{C_0}(t) = u_{C_{01}}(t) + u_{C_{02}}(t) + \dots + u_{C_{0(2,J)}}(t), \quad (5)$$

де  $J = \frac{T}{T_I} = \frac{0,04\text{с}}{0,005\text{с}} = 8$  – це відношення, яке показує, у скільки разів період  $T$  напруги  $u_d(t)$  більший від періоду імпульсів  $T_I$  електротехнологічного навантаження.

Знайдено напругу на конденсаторі  $\tilde{N}_1$  і розглянуто роботу контуру  $C_0, R_{L_1}, VS_1, C_1, L_1, C_0$ . На інтервалі  $t_{i_1} = 0 \dots t_{\hat{e}_1} = t_1$  напругу  $u_{C_{11}}(t)$  визначено як

$$\frac{d^2 u_{C_{11}}(t)}{dt^2} = -\frac{u_{C_{11}}(t)}{L_1 C_1} + \frac{u_d(t)}{L_1 C_1}. \quad (6)$$

Рішення (6) визначено на інтервалі  $t_{i_1} \dots t_{\hat{e}_1}$  у вигляді матриці  $U_{C_{11}}$  аналогічно (3).

На інтервалі  $t_1 \dots t_2$  розглянуто роботу контуру  $C_1, R_H, VS_2, L_H, C_1$ . На цьому інтервалі тиристор  $VS_1$  – закритий, а тиристор  $VS_2$  – відкритий, напругу  $u_{C_{12}}(t)$  визначено як

$$\frac{d^2 u_{C_{12}}(t)}{dt^2} = \frac{-R_H du_{C_{12}}(t)}{L_H dt} - \frac{u_{C_{12}}(t)}{L_H C_1}, \quad (7)$$

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

Рішення (7) визначено на інтервалі  $t_{i_2} \dots t_{\hat{e}_2}$  у вигляді матриці  $U_{C_{12}}$  аналогічно (3).

У цей же спосіб знайдено напруги на інших інтервалах і сумарну напругу  $u_{C_1}(t)$  за період зміни напруги  $u_d(t)$ :

$$u_{C_1}(t) = u_{C_{11}}(t) + u_{C_{12}}(t) + \dots + u_{C_{1(2,J)}}(t). \quad (8)$$

Далі визначено струм навантаження  $i_H(t)$ :

$$i_H(t) = \text{if} \left( \frac{du_{C_1}(t)}{dt} > 0, C_1 \frac{du_{C_1}(t)}{dt}, 0 \right) - C_1 \frac{du_{C_1}(t)}{dt}. \quad (9)$$

Загальний вираз для  $i$ -х фаз мережі подано у вигляді:

$$i_H(t) = \sum_{n=1}^{N=9} \left( \text{if} \left( \frac{du_{C_1}(t)}{dt} > 0, C_1 \frac{du_{C_1}(t)}{dt}, 0 \right) + C_0 \frac{du_{C_0}(t)}{dt} \right) \frac{\Psi_B(i, t) \Psi(n, N, t) \Psi_{BB}(t)}{k_T}. \quad (10)$$

Діаграми напруг на виході ВВ та  $u_{C_1}(t)$  і струму навантаження за умови  $\tilde{N}_0 = 2200 \text{ i } \hat{e}\hat{O}$ ,  $\tilde{N}_1 = 100 \text{ i } \hat{e}\hat{O}$ ,  $R_H = 3 \text{ i } \hat{e}\hat{O}$  та  $R_{L_1} = 0,05 \text{ i } \hat{e}\hat{O}$ ,  $L_1 = 162 \text{ i } \hat{e}\hat{A}\hat{i}$ ,  $L_H = 1 \text{ i } \hat{e}\hat{A}\hat{i}$ ,  $U_{dmax} = 311 \text{ В}$  і  $k_T = 9$  для мережі частотою  $f = 50 \text{ k}\hat{e}\hat{O}$  і за частоти високочастотних імпульсів  $f_1 = 5000 \text{ k}\hat{e}\hat{O}$  показано на рис. 2.

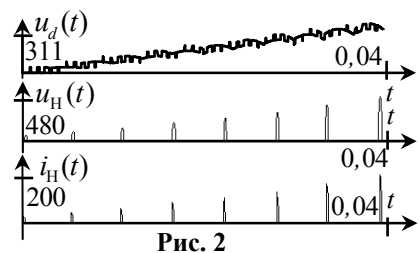


Рис. 2

Діаграми вхідних струмів  $i$ -х фаз мережі в координатах фазних напруг показано на рис. 3.

Аналіз складу високочастотних гармонік у вихідних і вхідних струмах на рис. 2 і 3 та відповідних струмах, отриманих у роботі [8], показав, що рівень високочастотних гармонік у вхідних і вихідних струмах за дев'ятизонного регулювання напруги на лінійному активно-індуктивному навантаженні є значно нижчим,

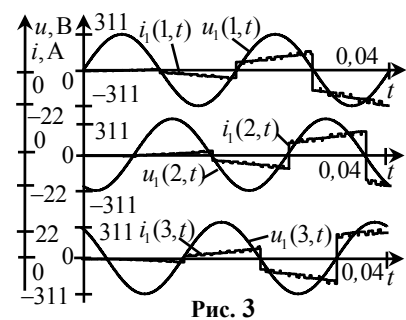


Рис. 3

ніж за сімнадцятизонного.

**Висновки.** 1. Розроблено математичну модель для аналізу усталених і перехідних процесів у трифазних електричних колах з напівпровідниковими високочастотними перетворювачами модуляційного типу, що використовують дев'ятизонне широтно-імпульсне регулювання фазних напруг трифазної мережі, без урахування втрат електроенергії в напівпровідникових комутаторах, що спрощує оцінку впливу параметрів навантаження на характеристики регульованих вихідних напруг. Використання такої моделі забезпечує швидке визначення алгоритмів управління комутаторами під час підключення вказаних перетворювачів до фазних напруг трифазної мережі та швидке визначення умов підвищення якості напруг за дев'ятизонного регулювання величини їхніх вихідних напруг.

2. Розроблено алгоритмічні рівняння відносно функцій із системними дискретними параметрами напівпровідникових комутаторів, напруг і кутів управління, фаз трифазної мережі електроживлення і часу для аналізу електромагнітних процесів у електричних колах змінної структури з напівпровідниковими комутаторами та ланками широтно-імпульсного регулювання фазних синусоїдних і постійних напруг трифазної мережі. Зокрема, виконано аналіз електромагнітних процесів у електричних колах високочастотних напівпровідникових перетворювачів з дев'ятизонним широтно-імпульсним регулюванням фазних напруг трифазної мережі для реалізації електроживлення електротехнологічного навантаження за зміни його параметрів у широких межах.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі» (шифр «ЕЛКАБ»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 04.07.2017 р., протокол № 11. Державний реєстраційний номер роботи 0117U007713.

1. Nguyen P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *Journal of Applied Physics*, 2014. Vol. 115. No 17. Pp. 17A756 – 1.
2. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2015. Vol. 51. Iss. 6. Pp. 581 – 588.
3. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 23 – 25.
4. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Закономерности изменения потерь энергии в RL-цепях, соединяющих конденсаторы, заряженные до разных напряжений. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 6. С. 3 – 7.
5. Макаренко М.П., Сенько В.І., Юрченко М.М. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії. К.: ІЕД НАН України, 2005. 241 с.
6. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И. Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков. *Технічна електродинаміка*, 2013. № 2. С. 10 – 18.
7. Михайленко В.В. Метод багатопараметричних функцій для аналізу перехідних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Энергосбережение, Энергетика, Энергоаудит. Спец. Выпуск. 2013. Т.2. № 8 (114). С. 56 – 59.
8. Сенько В.І., Михайленко В.В., Юрченко М.М., Юрченко О.М., Чуняк Ю.М. Аналіз електромагнітних процесів у колах з напівпровідниковими перетворювачами з сімнадцятизонним регулюванням вихідної напруги. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 23 – 25.
9. Sinha G. Lipo T.A. A four level inverter based drive with a passive front end. Proc. *IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE-PESC'99 Conf.* Charleston, SC, USA, 1999. Pp. 590 – 595.
10. Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the Linear Modulation in Matrix Converters. *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2014. Vol. 29. No 6. Pp. 3166 – 3178.

УДК 621.314

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ДЕВЯТИЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ**

**В.И. Сенько<sup>1</sup>**, докт. техн. наук., **В.В. Михайленко<sup>1</sup>**, канд. техн. наук., **С.С. Розискулов<sup>2</sup>**, **С.А. Бурьян<sup>1</sup>**, **Ю.М. Чуняк<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского",

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: [VladislavMihailenko@i.ua](mailto:VladislavMihailenko@i.ua)

<sup>2</sup>– Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

Выполнено моделирование и анализ установившихся и переходных процессов в трехфазных электрических цепях с полупроводниковыми преобразователями, которые используют девятизонное регулирование напряжения на электротехнологической нагрузке, представленной активно-индуктивным сопротивлением. Моделирование проведено с использованием метода многопараметрических функций, что позволило упростить составление алгоритмических уравнений для анализа электромагнитных процессов в преобразователях, в электрических цепях которых может находиться больше двух независимых реактивных элементов. Без учета потерь электроэнергии в полупроводниковых коммутаторах преобразователей показаны особенности использования фазных напряжений сети электропитания для реализации девятизонного регулирования их выходного напряжения. Приведены графики, отражающие особенности регулирования такого напряжения на электротехнологической нагрузке. Библ. 10, рис. 3.

**Ключевые слова:** выходные напряжение и ток, метод многопараметрических модулирующих функций.

#### TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRIC CIRCUITS OF SEMICONDUCTOR CONVERTERS WITH NINE ZONED REGULATION OF VOLTAGE ON ELECTROTECHNOLOGICAL LOAD

V.I. Senko<sup>1</sup>, V.V. Mykhailenko<sup>1</sup>, S.S. Roziskulov<sup>2</sup>, S.A. Buryan<sup>1</sup>, J.M. Chunyak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>– National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
pr. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: [VladislavMihailenko@i.ua](mailto:VladislavMihailenko@i.ua)

<sup>2</sup>– Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

The simulation and analysis of steady-state and transient processes in three-phase electrical circuits with semiconductor converters using nine-zone voltage regulation on the electro-technological load in the form of active-inductive resistance is carried out. The simulation was carried out using the method of multivariable functions, which made it possible to simplify the view of algorithmic equations for the analysis of electromagnetic processes in converters whose electrical circuits can contain more than two independent reactive elements. Without taking into account the power losses in semiconductor switches of the converters, the features of using the phase voltages of the power supply network to realize the nine-zone regulation of their output voltage are shown. The graphs reflecting the features of regulation of this voltage on the electrotechnological load are given. Ref. 10, fig. 3.

**Keywords:** output voltage and current, method multivariable modulating function.

1. Nguyen P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. No 17. Pp. 17A756 – 1.
2. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51. Iss. 6. Pp 581 – 588.
3. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load taking in to account its changes during discharge current flowing in the load and at zero current in it. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 5. Pp. 23 – 25. (Rus)
4. Suprunovska N.I., Shcherba A.A., Ivashchenko D.S., Beletsky O.A. Processes of energy exchange between nonlinear and linear links of electric equivalent circuit of supercapacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 5. Pp. 3 – 11. (Rus)
5. Makarenko M.P., Senko V.I., Yurchenko M.M. System analysis of electromagnetic processes in semiconductor converters of electric power. Kyiv: IED NAN Ukraine, 2005. 241 p. (Ukr)
6. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M., Ushakov V.I. Computer Modeling of Electrothermal Processes and Thermomechanical Stress at Induction Heating of Moving Copper Ingots. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 2. Pp. 10 – 18. (Rus)
7. Mykhailenko V.V. Method much parametric functions for analysis of the connecting processes in electric circuit with semiconductor commutator. *Energy Saving, Energy, Energy Audit. Special Issue*. 2013. V.2. No 8 (114). Pp. 56 – 59. (Ukr).
8. Senko V.I., Mykhailenko V.V., Yurchenko M.M., Yurchenko O.M., Chunyak J.M. Analysis of the electromagnetic processes in circuit with semiconductor converter with seventeen zoned regulations of the output voltage. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 23 – 25. (Ukr).
9. Sinha G. Lipo T.A. A four level inverter based drive with a passive front end. *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE-PESC'99 Conf.* Charleston, SC, USA, 1999. Pp. 590 – 595.
10. Zari, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the Linear Modulation in Matrix Converters. *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2014. Vol. 29. No 6. Pp. 3166 – 3178.

Надійшла 19.04.2018

Received 19.04.2018