

УДК 621.314

В. В. Михайленко, В. І. Чибеліс, кандидати техн. наук,
Ю. М. Чуняк

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ШЕСТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

***Анотація.** Проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах.*

***Ключові слова:** електромагнітні процеси, вихідна напруга, вихідний струм, струм навантаження, метод багатопараметричних модулюючих функцій*

**V. Mihailenko, PhD., V. Chibelis, PhD.,
J. Chunya**

ANALYSES OF THE ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN SEMICONDUCTOR CONVERTER WITH SHESTIZONNYM REGULATION OF THE OUTPUT VOLTAGE

***Abstract.** Analysis of the electromagnetic processes is organized in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis of the electromagnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. Graphs that show the electromagnetic processes in electric circuit are given.*

***Keywords:** electromagnetic processes, output voltage and current, current of the load, method multivariable modulating function*

В. В. Михайленко, В. И. Чибелис, кандидати техн. наук,
Ю. М. Чуняк

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ШЕСТИЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

***Аннотация.** Проведен анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создано математическую модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Показаны графики, иллюстрирующие электромагнитные процессы в электрических цепях.*

***Ключевые слова:** электромагнитные процессы, выходное напряжение, выходной ток, ток нагрузки, метод многопараметрических модулирующих функций*

Вступ

Тенденції якісного перетворення електричної енергії, а також успіхи у розвитку напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі [1-6]. У роботах [7-10] показана доцільність використання структур перетворювачів частоти (ПЧ) з однократною модуляцією при побудові систем вторинного електропостачання для комплексів діагностики електромеханічних пристроїв із різноманітним видом вхідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз аспекту

© Михайленко В.В., Чибеліс В.І.,
Чуняк Ю.М., 2014

використання тієї ж структури ПЧ для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при шестизонному керуванні.

Метою роботи є виконання аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами.

Аналіз електромагнітних процесів

Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: $СМ_{AB}$, $СМ_{BC}$, $СМ_{CA}$ – силові модулятори (СМ) лінійних AB , BC і CA відповідно, $ВВ$ – високочастотний випрямляч, $Н$ – навантаження. Сукупність СМ, підключених до енергетичної мережі паралельно і з'єднаних по виходу послідовно, представляє собою ланку високої частоти перетворювача. Структура СМ представлена на рис. 2.

турною організацією і з виразом (1), запишемо сумою

$$u_2(t) = \sum_{P=1}^{N=6} \sum_{j=1}^3 k_T u_1(j,t) \psi_1(j,t) \psi_2(\alpha_p,t), \quad (5)$$

а вихідну напругу перетворювача $u_d(t)$ як випрямлену напругу (5) подамо виразом

$$u_d(t) = \sum_{P=1}^6 \sum_{j=1}^3 (k_T u_1(j,t) \psi_1(j,t) \times \times \psi_2(\alpha_p,t) \psi_3(t)), \quad (6)$$

де $\psi_3(t)$ – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача:

$$\psi_3(t) = \text{sign}(u_2(t)). \quad (7)$$

Діаграми вихідних напруг ланки високої частоти $u_2(t)$ і перетворювача $u_d(t)$, побудовані за (5) і (6) при зміні величини кута управління α_p по лінійному закону в координатах $\vartheta = \omega_1 t$, подані на рис. 3.

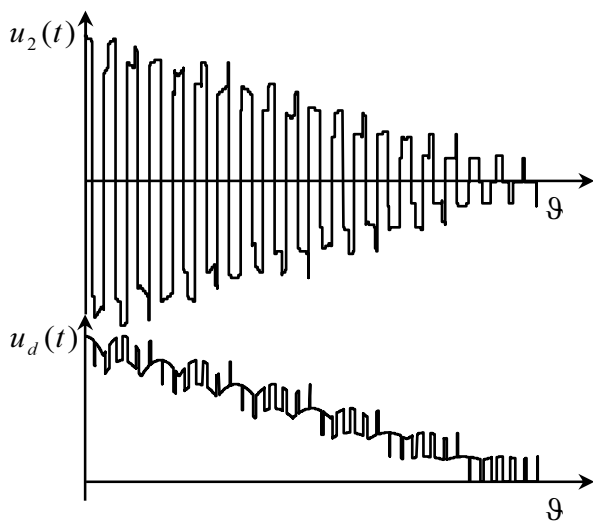


Рис. 3. Діаграми вихідних напруг ланки високої частоти $u_2(t)$ і перетворювача $u_d(t)$

Для більш детального аналізу вихідної напруги перетворювача в (5) позначимо $u_1(j,t) \psi_1(j,t) = |u_1(j,t)|$ і, враховуючи (3) та (4), а також те, що в (6) $\psi_2(\alpha_p,t) v(t) = |\psi_2(\alpha_p,t)|$, алгоритмічне рівняння перепишемо у вигляді

$$u_d(t) = \frac{k_T}{2} \sum_{p=1}^6 \left(\sum_{j=1}^3 \left(U_{1m} \sin(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \frac{(j-1)2\pi}{3} \left| \sum_2 \sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \varphi) \right| \right) \right). \quad (8)$$

З приведених діаграм і (8) видно, що вихідна напруга перетворювача досягне максимального значення при умові $\alpha_p(t) = 0$. В цьому випадку частота пульсацій вихідної напруги $\omega_i = 6\omega_1$, а (8) прийме вигляд

$$u_d(t) = \frac{6k_T}{2} \sum_{j=1}^3 \left(U_{1m} \sin \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right) \right). \quad (9)$$

З останнього виразу легко знайти середнє значення вихідної напруги, котре подається як

$$U_{d0} = 2,7k_T (U_{11} + U_{12} + U_{13} + \dots + U_{16}) = 2,7(U_{21} + U_{22} + U_{23} + \dots + U_{26}), \quad (10)$$

де: $U_{11}, U_{12}, U_{13}, \dots, U_{16}$ і $U_{21}, U_{22}, U_{23}, \dots, U_{16}$ – відповідно діючі значення напруг первинних і вторинних обмоток узгоджувальних трансформаторів для першої, другої, третьої, ..., шостої зони регулювання вихідної напруги $U_{2p} = k_T U_{1p}$.

В повному діапазоні зміни $\alpha_p(t)$ регулювальна характеристика перетворювача приймає вигляд

$$U_{d\alpha} = 2,7 \sum_{p=1}^6 U_{2p} \gamma, \quad (11)$$

де $\gamma = t_i/T_2$ – коефіцієнт заповнення; t_i – ширина імпульсу вихідної напруги при ШПР; T_2 – період модулюючого впливу; $t_i = 0 \div T_2$; $T_2 = 2\pi/\omega_2$.

Диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо у вигляді

$$L \frac{di(t)}{dt} + i_d(t) R = u_d(t). \quad (12)$$

Струм навантаження знайдемо шляхом виразу його похідної у рівнянні (12), як реакцію одноконтурного RL -ланцюга на дію напруги (6):

$$D(t) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} i_d(t), \quad (13)$$

де $i(t)$ – функція струму; R і L – відповідно активний опір і індуктивність навантаження.

Рішення (13) відносно струму навантаження визначимо числовим методом Рунге-Кутта, використовуючи функцію `rkfixed` математичного пакету MathCad і вважаючи, що в початковий момент часу коло навантаження підключається до напруги $u_d(t)$,

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(0, k, s, D), \quad (14)$$

де k – часовий інтервал рішень; s – кількість точок на часовому інтервалі рішень; D – вектор функція диференціальних рівнянь.

Враховуючи ту обставину, що на інтервалах нульових пауз (7) струм навантаження підтримується в контурі навантаження і діодів ВВ за рахунок енергії, яка запасається в індуктивності за попередні цикли роботи перетворювача і з енергетичної мережі не споживається, для визначення вихідного струму $i_2(t)$ ланки високої частоти достатньо вираз (14) помножити на функцію (7), що співпадає за часом з (6):

$$i_2(t) = i_d(t)\psi_3(t). \quad (15)$$

Для визначення вхідних струмів інверторів врахуємо, що $i_2(t)$ протікає в загальному контурі всіх СМ, утвореному послідовно з'єднаними вторинними обмотками узгоджувальних трансформаторів і прийемо до уваги вираз (6) і те, що (2), (4) і (7) є функціями одиничної амплітуди.

При цьому у загальному виді

$$i_1(P, j, t) = \frac{i_2(t)\psi_1(j, t)\psi_2(\alpha_P, t)}{k_T}. \quad (16)$$

Вхідні струми інверторів $i_1(P, j, t)$ можуть бути визначені при відомому струмі навантаження без попереднього розрахунку вихідного струму $i_2(t)$ ланки високої частоти за (16). Для цього треба прийняти до уваги вираз (6) і тоді, враховуючи (15), отримаємо

$$i_1(P, j, t) = \frac{i_d(t)\psi_1(j, t)|\psi_2(\alpha_P, t)|}{k_T}. \quad (17)$$

Діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти, побудовані за (15) – (17) для тризонного регулювання, представлені на рис. 4.

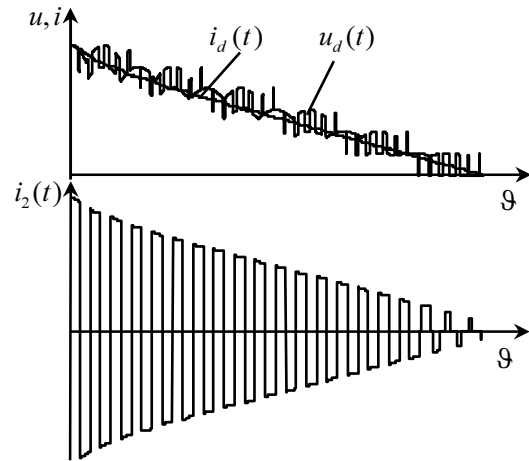


Рис. 4. Діаграми струму та напруги навантаження і вихідного струму ланки високої частоти

Для визначення вхідних СМ у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги підсумуємо вхідні струми відповідних ІВН. Враховуючи (17), загальний вираз для вхідних струмів СМ подамо у вигляді

$$i_1(j, t) = i_1(1, j, t) + i_1(2, j, t) + i_1(3, j, t) + \dots + i_1(6, j, t), \quad (18)$$

де $i_1(1, j, t)$, $i_1(2, j, t)$, $i_1(3, j, t)$, ..., $i_1(6, j, t)$ – вхідні струми ІВН для першої, другої, третьої, ..., шостої зони регулювання.

Струми i -х фаз енергетичної мережі з співвідношень

$$\begin{aligned} i_{10}(1, t) &= i_1(1, t) - i_1(3, t), \\ i_{10}(2, t) &= i_1(2, t) - i_1(1, t), \\ i_{10}(3, t) &= i_1(3, t) - i_1(2, t). \end{aligned} \quad (19)$$

Діаграми вхідних струмів відповідних СМ, побудовані за (18), представлені на рис. 5.

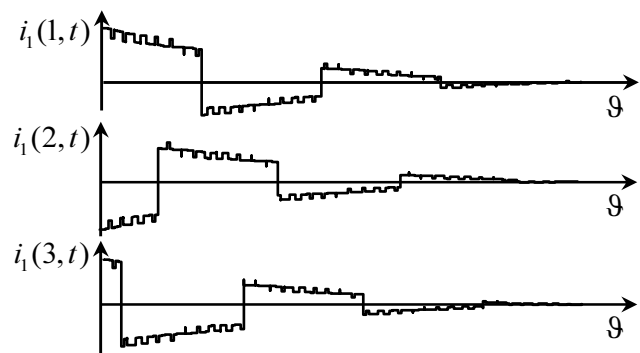


Рис. 5. Діаграми вхідних струмів відповідних СМ

Діаграми вхідних струмів i -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (19), представлені на рис. 6.

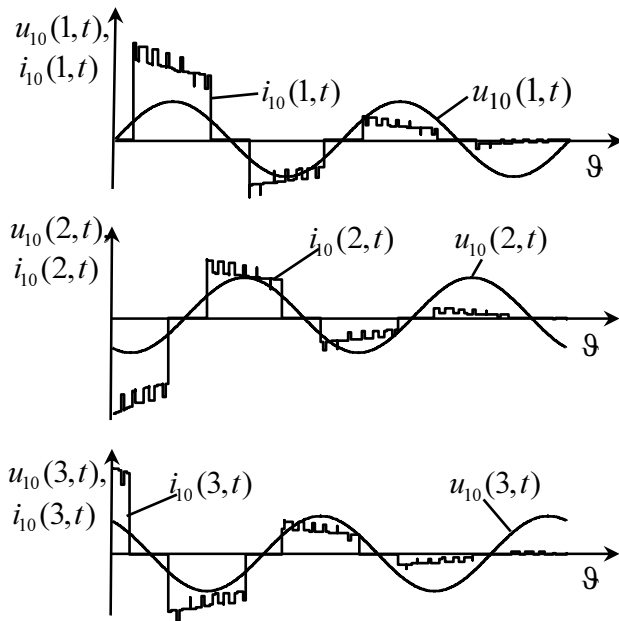


Рис. 6. Діаграми вхідних струмів i -х фаз мережі в координатах фазних напруг

Для того, щоб знайти амплітудні значення струмів через силові транзистори ІВН, достатньо проаналізувати струми $i_{1T}(P, j, t)$ первинних обмоток узгоджувальних трансформаторів, які знаходяться в колах протікання струмів через силові транзистори.

Враховуючи (15) і число каналів перетворення енергії, отримаємо

$$i_{1T}(P, j, t) = \frac{i_2(t)}{k_T}. \quad (20)$$

За часом ці струми співпадають з вихідним струмом ланки високої частоти перетворювача і відрізняються лише амплітудою.

Проводячи аналіз діаграм вхідних струмів i -х фаз енергетичної мережі на рис. 6, робимо висновок, що ці струми змінюються за законом синусоїди з накладанням високо-частотних пульсацій.

Висновки

Таким чином, у данній роботі було виконано аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Використовуючи метод багатопараметричних модулюючих функцій, було знайдено струм і напругу навантаження, а також вхідні струми перетворювача. У роботі розвинуто метод багатопараметричних

функцій в частині розробки нової математичної моделі з багатозонним регулюванням вихідної напруги та визначення модулюючих функцій для аналізу за підсистемними складовими структури електричних кіл з напівпровідниковими комутаторами. Використання методу багатопараметричних модулюючих функцій у електричних колах змінної структури є доцільним, якщо в їх ланках є не більше трьох незалежних реактивних елементів. Данні розрахунків порівняно з даними експериментів відрізняється не більше, ніж на 1 %.

Узагальнюючі функції багатопараметричного виду ефективні і для інших перетворювачів модуляційного типу. Наприклад, при підключенні напівпровідникових перетворювачів до джерел імпульсної напруги.

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 – К. : НАН України, ІЕД, 2005. – 241 с.
2. Макаренко М. П. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачах з багатозонним регулюванням вихідної напруги функціями багатопараметричного виду / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч. 1. – С. 19 – 22.
3. Макаренко Н. П. Аналіз електромагнітних процесів в дванадцятипульсному преобразователе с зонным регулированием выходного напряжения / Н. П. Макаренко, В. В. Михайленко, Н. Н. Юрченко // Вестник НТУ "Харьковский политехнический институт". "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2002. – Т. 1. – С. 233 – 234.
4. Макаренко М. П. Математична модель перетворювача трифазної напруги в постійну напругу / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Електроніка і зв'язь. – 2002. – № 14. – С. 73 – 75.
5. Макаренко М. П. Деякі аспекти комп'ютерного аналізу напівпровідникових

перетворювачів електроенергії з багаторозгалуженими структурами / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2004. – Ч. 1. – С. 112 – 115.

6. Макаренко М. П. Моделювання електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії з урахуванням параметрів мережі живлення / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2005. – Ч. 2. – С. 48 – 51.

7. Макаренко М. П. Алгоритмічно-структурні аспекти аналізу імпульсних перетворювачів змінної напруги / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко, В. В. Пілінський, В. І. Сенько, М. М. Юрченко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2007. – Ч. 4. – С. 66 – 69.

8. Макаренко М. П. Аналіз електромагнітних процесів у модуляційному напівпровідниковому перетворювачі напруги з електромеханічним навантаженням / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2003. – Ч. 3. – С. 21 – 24.

9. Макаренко М. П. Імітаційна модель напівпровідникового перетворювача електроенергії з електромеханічним навантаженням / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Вестник НТУ "Харьковский политехнический институт". "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2004. – Вып. 43. – С. 150 – 151.

10. Макаренко М. П. Деякі аспекти системного аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Вестн. НТУ "Харьковский политехнический институт". "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2005. – Вып. 45. – С. 384 – 385.

11. Shakweh Y., and Lewis E.A. Assessment of Medium Voltage PWM VSI Topologies for Multi-megawatt Variable Speed

Drives Applications, (1999), *Proc. IEEE – PESC '99 Conf.*, pp. 590 – 595.

12. Wheeler P.W., Clare C., Empringham L., Bland M., and Wheeler J. The Technology and Potential of Matrix Converters, (2001), *Power Electronics Europe*, No. 5, pp. 25 – 28.

Отримано 10.05.2014

References

1. Makarenko M.P., Senko V.I., and Yurchenko M.M. Sistemiy analiz elektromagnitnyh procesiv u napivprovidnykovykh peretvoruvachah elektroenergii modulaciynogo typu [System Analysis of the Electromagnetic Processes in Semiconductor Converter of the Electric Powers Inflexion Type], (2005), *National Academy of the Sciences of the Ukraine, Institute of Electrodinamiks Publ.*, Kiev, Ukraine, 241 p. (In Ukrainian).

2. Makarenko M.P., and Mihaylenko V.V. Analiz elektromagnitnyh procesiv u peretvoruvachah z bagatozonnym reguljuvannjam vuhidnoji naprugi funkciyamy bagatoparametruchnogo vydu [The Analysis of the Electromagnetic Processes in Converter with much Zoned Regulations of the Output Voltage Function Multivariable Type], (2002), *Technicheskaia Electrodinamika. Silova Elektronika i Energoefektivnist. Thematic Vypusk. Publ.*, Kiev, Ukraine, Part 1, pp. 19 – 22 (In Ukrainian).

3. Makarenko N.P., Mihaylenko V.V., and Yurchenko N.N. Analiz elektromagnitnyh procesov v dvenadcatipulsnom preobrazovatele s zonnym regulirovaniem vyhodnogo naprjageniya [Analysis of the Electromagnetic Processes in Twelve Pulse Converter with Zoned Regulation of the Output Voltage], (2002), *Herald National Technical "Harikovskiy Pollytechnic Institute". "Problems Automated Electrodrive. Theory and Practice" Publ.*, Kharkov, Ukraine, Part 1, pp. 233 – 234 (In Russian).

4. Makarenko M.P., and Mihaylenko V.V. Matematychna model peretvoruvacha tryfaznoj naprugi v postiny naprugu [Mathematical Model of the Converter of the Three-phase Voltage in Direct Voltage], (2002), *Electronics i Svjaz Publ.*, Kiev, Ukraine, No. 14, pp. 73 – 75 (In Ukrainian).

5. Makarenko M.P., and Mihaylenko V.V. Deyaki aspekty kompyuternogo analizu napivprovidnykovykh peretvoruvachiv electroenergii z bagatorozgaludgenymy structuramy [Some Aspects of the Computer Analysis of the Semiconductor Converters to Electroenergy with much Furcated Structure], (2004), *Technicheskaia Electrodinamika. Silova Elektronika i Energoefektivnist. Thematic Vypusk Publ.*, Kiev, Ukraine, Part 1, pp. 112 – 115 (In Ukrainian).

6. Makarenko M.P., and Mihaylenko V.V. Modelyuvannya elektromagnitnykh procesiv u napivprovidnykovykh peretvoruvachah electroenergii z urahuvannyam parametriv meregi guvlennya [Modeling of the Electromagnetic Processes in Semiconductor Converter of the Electroenergy with Provision for Parameter of the Network of the Power Supply], (2005), *Technicheskaia Electrodinamika. Silova Elektronika i Energoefektivnist. Thematic Vypusk Publ.*, Kiev, Ukraine, Part 2, pp. 48 – 51 (In Ukrainian).

7. Makarenko M.P., Mihaylenko V.V., Pslsnskiy V.V., and Yurchenko M.M. Algoritmichno-strukturni aspekty analizu impulnykh peretvoruvachiv zminnoj naprugy [Algorithmic Structured Aspects of the Analysis of the Pulsed Converters of the Variable Voltage], (2007), *Technicheskaia Electrodinamika. Silova Elektronika i Energoefektivnist. Thematic Vypusk Publ.*, Kiev, Ukraine, Part 4, pp. 66 – 69 (In Ukrainian).

8. Makarenko M.P., Mihaylenko V.V., Pslsnskiy V.V., and Yurchenko M.M. Analiz elektromagnitnykh procesiv u moduljaciynomu napivprovidnycovomu peretvoruvachi naprugy z electromechanichnum navantagenjam [Analysis of the Electromagnetic Processes in Modulation Semiconductor Converter Voltages with Electromechanical Load], (2003), *Technicheskaia Electrodinamika. Silova Elektronika i Energoefektivnist. Thematic Vypusk Publ.*, Kiev, Ukraine, Part 3, pp. 21 – 24 (In Ukrainian).

9. Makarenko M.P., and Mihaylenko V.V. Imitaciynna model napivprovidnykovogo peretvoruvacha electroenergii z electromechanichnym navantagenjam [Simulation Model of the Semiconductor Converter to Electroenergy with Electromechanical Load], (2004), *Herald National Technical "Harikovskiy Pollytechnic Institute". "Problems Automated Electro-*

drive. Theory and Practice" Publ., Kharkov, Ukraine, Vol. 43, pp. 150 – 151 (In Ukrainian).

10. Makarenko M.P., and Mihaylenko V.V. Deyaki aspekty systemnogo analizu elektromagnitnykh procesiv u napivprovidnykovykh peretvoruvachah electroenergii [Some Aspects of the System Analysis of the Electromagnetic Processes in Semiconductor Converter of the Electroenergy], (2005), *Herald National Technical "Harikovskiy Pollytechnic Institute". "Problems Automated Eelectrodrive. Theory and Practice" Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 45, pp. 384 – 385 (In Ukrainian).

11. Shakweh Y., and Lewis E.A. Assessment of Medium Voltage PWM VSI Topologies for Multi-megawatt Variable Speed Drives Applications, (1999), *Proc. IEEE-PESC'99 Conf. Publ.*, London, England, pp. 590 – 595 (In English).

12. Wheeler P.W., Clare J.C., Empringham L., and Bland M. The Technology and Potential of Matrix Converters, (2001), *Power Electronics Europe Publ.*, London, England, No. 5, pp. 25 – 28 (In English).



Михайленко Владислав Володимирович, канд.техн.наук,асистент каф. теоретич. електротехн. Нац. техніч. ун-ту України "Київський політехн. ін-т" м. Київ, пр-т Перемоги, 37, e-mail:Vladislav Mihailenko@i.ua



Чибеліс Валерій Іванович, канд.техн. наук, доц. каф. теоретич. електротехн. Нац. техніч. ун-ту України "Київський політехн. ін-т" м. Київ, пр-т Перемоги, 37, e-mail: toe209@gmail.com



Чуняк Юлія Михайлівна, асистент каф. теоретичної електротехніки Нац. технічного ун-ту України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, пр-т Перемоги, 37, e-mail: j.chunya@ukr.net