

**В.В. МИХАЙЛЕНКО**, канд. тех. наук, ст. викл. НТУУ "КПІ", Київ

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З СЕМИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Розроблено нові математичні моделі електромагнітних процесів у трифазних електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатоканальним зонним регулюванням фазних напруг без урахування енергетичних втрат у напівпровідникових комутаторах для швидкої оцінки впливу параметрів навантаження на рівень і форму вихідної напруги.

**Ключові слова:** електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм, двигун постійного струму, метод багатопараметричних модулюючих функцій.

**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 [1-10]. У роботах [1-4] 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 використання тієї ж структури ПЧ для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при семизонному керуванні.

**Метою роботи** є виконання аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і розробка математичної моделі напівпровідникового перетворювача (НПП) з електромеханічним навантаженням.

**Аналіз електромагнітних процесів.** Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних А, В і С відповідно, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження; D – двигун постійного струму. Сукупність СМ, підключених до енергетичної мережі паралельно і з'єднаних по виходу послідовно, представляє собою ланку високої частоти перетворювача.

© В.В. Михайленко, 2015

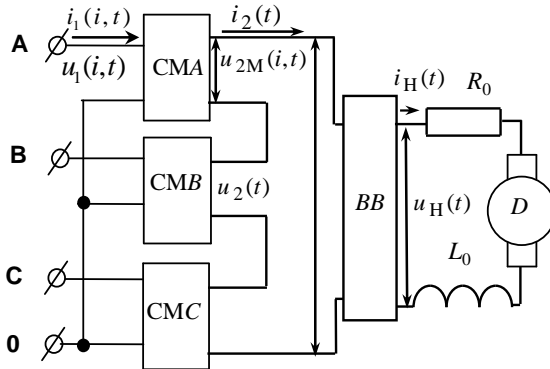


Рис. 1 – Структурна схема НПП з електромеханічним навантаженням

Порівняльні дослідження техніко-економічних показників різного виду виконавчих елементів слідкуючих систем на основі високомоментних двигунів постійного струму (ДПС) серій 2П та ПВ і трифазних асинхронних двигунів серії 4А, які випускаються промисловістю серійно [4], показують, що за умови однакових показників за масою та габаритами в діапазоні потужностей від 100 Вт до 500 кВт, у слідкуючих системах доцільніше використовувати ДПС.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використовуємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [5], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому прийmemo такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди інверторів випрямленої напруги (ІВН) представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної напруги не мають втрат.

Проведення системного аналізу електромагнітних процесів у модуляційному НПП з багатозонним регулюванням вихідної напруги з навантаженням у вигляді ДПС з послідовним збудженням, з урахуванням таких ознак системного підходу до аналізу [4], як цілісність та вплив під час її руху зовнішніх і внутрішніх факторів.

Вихідну напругу НПП знаходимо з виразу виду

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{n=1}^{N=7} \sum_{i=1}^3 u_1(i,t) \psi_B(i,t) \psi(n, N, t) \psi_{BB}(t), \quad (1)$$

де  $u_1(i, t)$  – миттєві значення фазних напруг мережі,  $\Psi_B(i, t)$  – функції прямокутного синуса, що співпадають за часом з положенням відповідних фазних напруг.  $n = 1, 2, 3, \dots, N$  – номери зон регулювання вихідної напруги;  $\Psi(n, N, t)$  – множина еквівалентних модулюючих впливів  $i$ -х інверторів СМ;  $\Psi_{BB}(t)$  – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням напруги  $u_2(t)$  ланки високої частоти НПП;  $k_T$  – коефіцієнт трансформації трансформаторів СМ.

ДПС, що задає вихідний струм НПП, описується системою алгебраїчних рівнянь [4], яка подає миттєві значення струму кола якоря та його кутової швидкості з урахуванням пускового режиму у вигляді

$$\begin{pmatrix} i_{H_k}(t) + \frac{2(c(t) - \varepsilon_{ch})}{a_1} - \frac{2\varepsilon_a}{a_1} i_{H_k}(t) - \\ - \frac{2}{a_1} n_k(t) i_{H_k}(t) - \frac{2}{a_1 a_3} i_{H_k}^3(t); \\ i_{H_{k+1}}(t) \\ n_{k+1}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_k(t) + \frac{4(c(t) - \varepsilon_{ch}) i_{H_k}(t)}{a_1 a_3} - \\ - \frac{2\varepsilon_M}{a_3} n_k(t) + \frac{2}{a_3} i_{1_k}^2(t) - \\ - \frac{2}{a_1 a_3} i_{H_k}^2(t) n_k(t) - \frac{2\varepsilon_{M0}}{a_3}, \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $i_{H_k}(t)$ ,  $i_{H_{k+1}}(t)$ ,  $n_k(t)$ ,  $n_{k+1}(t)$  – струм якоря та кутова швидкість обертання ДПС на  $k$ -ому та в  $k+1$ -ому інтервалі відповідно;  $\varepsilon_{ch}$ ,  $\varepsilon_a$  – відносні падіння напруги на щітках і обмотці якоря;  $\varepsilon_M$ ,  $\varepsilon_{M0}$  – відносні моменти опору на валу;  $c(t) = \frac{u_H(t)}{E}$  – відносне значення напруги на якорі;  $u_H(t)$  та  $E$  – відповідно миттєві значення вихідної напруги НПП та проти ЕРС;  $a_1 = \varepsilon_a + \frac{2T_{ab}}{\Delta t}$ ,  $a_3 = \varepsilon_M + \frac{2T_M}{\Delta t}$ ;  $T_{ab}$  та  $T_M$  – електромагнітна та механічна постійні часу двигуна,  $\Delta t$  – інтервали часу, за якими проводяться розрахунки процесів.

Система (2) вирішується за допомогою методу припасовування з попереднім записом початкових умов при  $t = 0$  та припущеннями ідносно лінійної залежності моменту опору на валу двигуна від швидкості обертання [3] і лінеаризованої кривої намагнічування.

Діаграми струмів кола якоря ДПС для випадку семизонного регулювання вихідної напруги НПП наведені на рис. 2. Крива 1 відображає струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією максимальної величини напруги (3), а крива 2 – струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією напруги (3) з семизонним широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) за лінійним законом.

Вихідний струм  $i_2(t)$  знаходимо з співвідношення

$$i_2(t) = i_{H_k}(t) \Psi_{BB}(t). \quad (3)$$

Вхідні струми  $i_1(n, i, t)$  знаходимо з виразу

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t) \Psi_B(i, t) \Psi(n, N, t)}{k_T}, \quad (4)$$

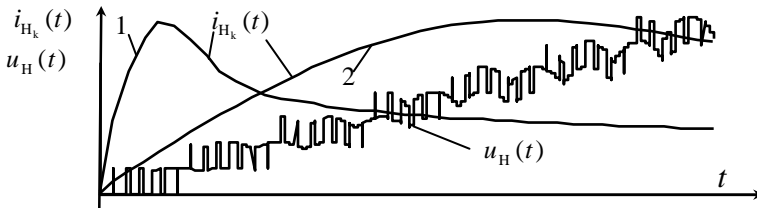


Рис. 2 – Діаграми струмів кола якоря ДПС

Для визначення струмів  $i$ -х фаз мережі у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги НПП підсумуємо вхідні струми ІВН, що беруть участь у процесі регулювання вихідної напруги в кожній з  $i$ -ї фази. Загальний вираз для струмів  $i$ -х фаз мережі подамо у вигляді

$$i_1(i, t) = i_1(1, i, t) + i_1(2, i, t) + \dots + i_1(N, i, t), \quad (5)$$

де:  $i_1(1, i, t)$ ,  $i_1(2, i, t)$ ,  $i_1(N, i, t)$  – вхідні струми інверторів  $i$ -х фаз на інтервалах першої, другої, та  $N$ -ї зони регулювання.

Діаграми вхідних струмів та напруг, побудовані за (5), представлені на рис. 3.

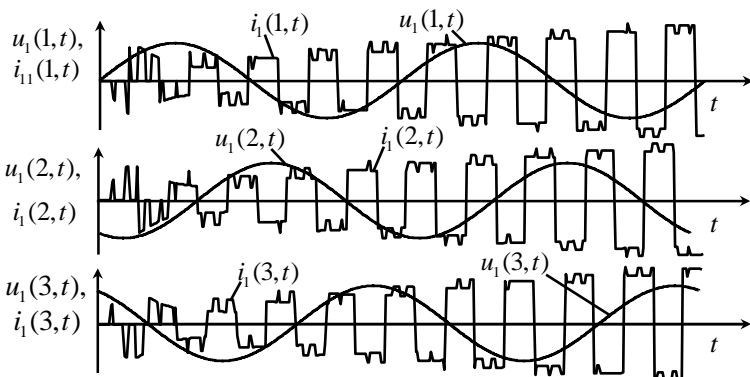


Рис. 3 – Діаграми вхідних струмів  $i$ -х фаз мережі в координатах фазних напруг

**Висновки.** Таким чином у данні роботі було виконано аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Використовуючи метод багатопараметричних модулюючих функцій було знайдено струм і напругу навантаження, а також вхідні струми перетворювача.

Створено нові схемотехнічні рішення напівпровідникових комутаторів з високочастотним широтноімпульсним регулюванням їх вихідної напруги при зміні параметрів навантаження в широких межах, які дозволили підвищити швидкодію електротехнологічних систем.

**Список літератури:** 1. *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. 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.* Анализ и моделирование электромагнитных процессов в силовых преобразовательных устройствах методом модулирующих функций / *Н.П. Макаренко* // Техн. електродинаміка. Системи електроживлення електротехнічних установок і комплексів. – Темат. вип. – 1999. – С.44-47. 4. *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. 5. *Макаренко Н.П.* Математическая модель процесса формирования выходных напряжений преобразователей частоты / *Н.П. Макаренко, Г. Абарка* // Электроника и связь. – 1999. – № 6, Т. 2. – С. 60-64. 6. *Макаренко М.П.* Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу / *М.П. Макаренко, В. Сенько, М.М. Юрченко* – К. : НАН України, ІЕД, 2005. – 241 с. 7. *Макаренко Н.П.* Экологические

вопросы сетей вторичных систем электроснабжения промышленных предприятий / *Н.П. Макаренко, Г. Абарка, Е.В. Небрат* // Вісник УБЕНТЗ. – 1999. – №5. – С. 7-12. **8.** Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 949-959. **9.** Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter, *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 575-584. **10.** Zari, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the linear modulational in matrix converters, *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 3166-3178.

**Bibliografy (transliterated):** **1.** Makarenko M.P., Mykhailenko V.V. "Analiz elektromahnitnykh protsesiv u moduliatsiinomu napivprovodnykovomu peretvoriuvachi napruhy z elektromekhanichnym navantazhenniam". *Tekhn. elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist"*. 3 (2003): 21-24. Print. **2.** Makarenko M.P., Mykhailenko V.V. "Analiz elektromahnitnykh procesiv u peretvorjuvachax z bahatozonnym rehljuvannjam vyxidnoji napruhy funkcyjamy bahatoparametrychno vydu". *Tekhn. elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist"*. 1 (2002): 19-22. Print. **3.** Makarenko N.P. "Analiz i modelirovanie jelektromagnitnykh processov v silovyh preobrazovatel'nyh ustrojstvah metodom modulirujushhijh funkcyj". *Tekhn. elektrodynamika. Systemy elektrozhivlennja elektrotehničnyx ustanovok i kompleksiv*. 1999: 44-47. Print. **4.** Makarenko M.P., Mykhailenko V.V. "Deiaki aspekty kompiuternoho analizu napivprovodnykovykh peretvoriuvachiv elektroenerhii z bahatorozghaluzhenymy strukturamy". *Tekhn. elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist"*. 1 (2004): 112-115. Print. **5.** Makarenko N.P., Abarka G. "Matematicheskaja model' processa formirovanija vyhodnyh naprjazhenij preobrazovatelej chastoty". *Jelektronika i svjaz'*. 6 (2) (1999): 60-64. Print. **6.** Makarenko M.P., Senko V., Yurchenko M.M. *Systemyi analiz elektromahnitnykh protsesiv u napivprovodnykovykh peretvoriuvachakh elektroenerhii moduliatsiinoho typu*. Kiyv: NAN Ukrainy, IED, 2005. Print. **7.** Makarenko N.P., Abarka G., Nebrat. E.V. "Jekologicheskie voprosy setej vtorichnyh sistem jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriatij". *Visnik UBENTZ*. 5 (1999): 7-12. Print. **8.** Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang "A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD". *IEEE Trans. On Industrial Electronics*. Vol 58. No 3 (2011): 949-959. Print. **9.** Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang "Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter". *IEEE Trans. On Power Delivery*. Vol 28, No 2. 575-584. Print. **10.** Zari, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. "Range of the linear modulational in matrix converters". *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol 29, No 6 (2014): 3166-3178. Print.

*Поступила (received) 29.12.2014*



**Михайленко Владислав Володимирович**, кандидат технічних наук. Захистив диплом магістра за спеціальністю "Електричні машини та апарати", дисертацію кандидата технічних наук у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за спеціальністю "Теоретична електротехніка" у 2014 році. Старший викладач кафедри "Теоретичної електротехніки" НТУУ "КПІ" з 2014 року. Наукові праці пов'язані з проблемами напівпровідникових перетворювачів з широтноімпульсним регулюванням вихідної напруги.