

В.В. МИХАЙЛЕНКО, Ю.М. ЧУНЯК, А.В. ПІНДА

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ЧОТИРИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

У даній статті здійснено аналіз електромагнітних процесів, що виникають в електричних колах із напівпровідниковими комутуючими елементами. Запропоновано нові математичні моделі, які описують перебіг електромагнітних процесів у трифазних електричних мережах напівпровідникових перетворювачів, що реалізують багатоканальне зонне регулювання фазних напруг. Розроблені моделі не враховують енергетичні втрати в комутаторах, що дозволяє оперативно оцінити вплив параметрів навантаження на рівень та форму вихідної напруги. Також сформовано математичну модель для дослідження електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах із широтно-імпульсним керуванням напругою на виході. Наведено графіки, які відображають характер змін електромагнітних параметрів у відповідних електричних схемах. Матеріали статті присвячені розвитку підходу багатопараметричних модулюючих функцій шляхом побудови нових математичних моделей та визначення функціональних і алгоритмічних рівнянь для проведення аналізу електромагнітних процесів у складних розгалужених електричних колах. Розглядаються підсистемні компоненти із напівпровідниковими комутаторами та ділянками з синусоїдальними, постійними та імпульсними джерелами напруги. Такі комутатори здатні виконувати високочастотну перебудову структури електричного кола та реалізовувати широтно-імпульсну модуляцію як фазних, так і лінійних напруг трифазної мережі електроживлення. Завдяки цьому забезпечується ефективне регулювання вихідної напруги у напівпровідникових перетворювачах електроенергії відповідно до заданих технічних параметрів.

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

V.V. MYKHAILENKO, J.M. CHUNIAK, A.V. PINDA

MATHEMATICAL MODEL OF A CONVERTER WITH FOUR-CHANNEL VOLTAGE REGULATION AND ELECTRICAL MECHANICAL LOADING

This paper presents an in-depth analysis of electromagnetic processes occurring in electrical circuits that utilize semiconductor switching devices. New mathematical models are proposed to describe the behavior of electromagnetic processes in three-phase electrical systems of semiconductor converters employing multi-channel zonal phase voltage control. These models intentionally neglect energy losses in the switching components to enable a fast and practical evaluation of how different load parameters affect both the magnitude and waveform of the output voltage. Additionally, a mathematical model is developed to investigate the behavior of semiconductor converters that use pulse-width modulation (PWM) for output voltage regulation. The article includes graphical results that illustrate the dynamic nature of electromagnetic processes in such electrical circuits. The research is also aimed at advancing the method of multi-parameter modulating functions by constructing novel mathematical models and defining corresponding functional and algorithmic equations. These tools are intended for analyzing electromagnetic phenomena in complex, branched electrical circuits with a modular structure. The focus is placed on subsystems that incorporate semiconductor switches and circuit segments exposed to sinusoidal, constant (DC), and pulsed voltage sources. Semiconductor switches in such systems are capable of performing high-frequency changes in circuit topology and implementing PWM of both phase and line voltages in a three-phase power supply network. This capability enables the precise regulation of output voltage characteristics in semiconductor-based power conversion systems according to specific operational requirements. The models and methods developed in this paper provide a theoretical basis for improving the efficiency and adaptability of electrical energy conversion systems, especially under varying load conditions and modulation schemes. Overall, the study supports the design and analysis of advanced converter systems used in modern power electronics, where high-performance control of electrical parameters is essential.

Keywords: electromagnetic processes; the output voltage and current; the engine of the direct current; method multivariable modulating function.

Вступ. Використання електричної енергії в сучасних перетворювальних установках відкриває можливість застосування високочастотної проміжної ланки, в якій частота комутації вентилів значно перевищує стандартну частоту змінного струму в промислових мережах [1–10]. У роботах [1–4] обґрунтовано ефективність застосування частотних перетворювачів із однократною модуляцією для побудови систем вторинного електроживлення, які використовуються в діагностичних комплексах електромеханічних пристроїв з різними джерелами вхідної енергії. У даній статті розглядається питання доцільності використання структури частотного перетворювача для електромеханічних систем із широтно-імпульсним регулюванням постійної напруги в умовах чотиризонного керування.

Метою роботи є аналіз процесів в електричних колах з перетворювачами і розробка математичної моделі перетворювача з електромеханічним навантаженням.

Аналіз електромагнітних процесів. Структурна схема перетворювача наведена на рис. 1. На схемі позначено: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ),

що відповідають фазам А, В і С; ВВ – випрямляч, який працює на високій частоті; Н – елемент навантаження; D – двигун постійного струму. Силові модулятори, з'єднані паралельно з мережею живлення і послідовно на виході, формують високочастотну проміжну ланку перетворювального пристрою.

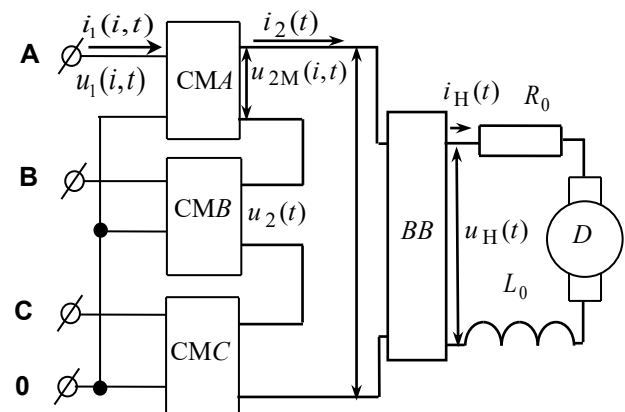


Рис. 1. Структурна схема НПП

© В.В. Михайленко, Ю.М. Чуняк, А.В. Пінда, 2025

Аналіз техніко-економічних характеристик різних типів виконавчих елементів у слідкуючих системах, виконаний на основі високомоментних двигунів постійного струму (ДПС) серій 2П і ПВ, а також трифазних асинхронних двигунів серії 4А, що серійно випускаються промисловістю [4], свідчить про доцільність застосування ДПС у зазначених системах. Це особливо актуально в діапазоні потужностей від 100 Вт до 500 кВт, за умови однакових масогабаритних показників. У таких умовах ДПС забезпечують кращі експлуатаційні властивості порівняно з асинхронними двигунами.

При побудові комп'ютерно-орієнтованої моделі перетворювального пристрою використано метод багатопараметричних модулюючих функцій [5], який передбачає попередню формалізацію алгоритмічного опису роботи перетворювача. Для спрощення моделювання приймаються такі припущення: вхідна електромережа є симетричною та має нульовий внутрішній опір; усі транзистори і діоди в інверторах випрямленої напруги (ІВН) вважаються ідеальними ключовими елементами; узгоджувальні трансформатори в кожній зоні регулювання вихідної напруги працюють без енергетичних втрат.

Аналіз динамічних процесів у модуляційному напівпровідниковому перетворювачі з багатозонним регулюванням вихідної напруги здійснюється з урахуванням навантаження у вигляді ДПС із послідовним збудженням. При цьому враховано принципи системного підходу, зокрема такі його риси, як цілісність системи та вплив зовнішніх і внутрішніх факторів під час її роботи [4].

Вираз для визначення напруги на навантаженні має вигляд:

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{n=1}^{N=4} \sum_{i=1}^3 u_1(i,t) \Psi_B(i,t) \psi(n,N,t) \Psi_{BB}(t), \quad (1)$$

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, $n = 1, 2, \dots, N = 4$ – номери зон регулювання; $\psi(n,N,t)$ – множина еквівалентних модулюючих впливів i -х інверторів CM ; $\Psi_{BB}(t)$ – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням напруги $u_2(t)$; k_T – коефіцієнт трансформації.

ДПС, що задає вихідний струм НПП, описується системою алгебраїчних рівнянь [4]

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

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; ε_{ch} , ε_a – відносні падіння напруги на щітках і обмотці якоря; ε_M , ε_{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, Δt – інтервали часу, за якими проводяться розрахунки.

Систему рівнянь (2) розв'язують методом апроксимації, задаючи початкові умови при $t=0$ та враховуючи припущення про лінійну залежність моменту опору на валу електродвигуна від швидкості його обертання [3], а також використовуючи лінеаризовану характеристику намагнічування.

На рис. 2 зображено діаграми струмів у колі якоря двигуна постійного струму (ДПС) для режиму чотиризонного регулювання вихідної напруги напівпровідникового перетворювача (НПП). Крива 1 ілюструє зміну струму в колі якоря під час запуску ДПС при дії максимальної напруги, визначеної рівнянням (3). Крива 2 демонструє процес запуску при застосуванні напруги згідно з рівнянням (3), але вже з реалізацією чотиризонного широтно-імпульсного регулювання (ШІР) відповідно до лінійного закону зміни.

Струм $i_2(t)$ знаходимо з виразу

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

Струми $i_1(n,i,t)$ знаходимо з виразу

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

Для визначення струмів i -ї фази мережі в повному діапазоні регулювання вихідної напруги напівпровідникового перетворювача (НПП), здійснюється підсумовування вхідних струмів інверторів випрямленої напруги (ІВН), що беруть участь у процесі регулювання в межах відповідної i -ї фази. Узагальнений вираз для струмів у фазах мережі можна записати у такій формі:

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

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 $N = 4$ -ї зони регулювання.

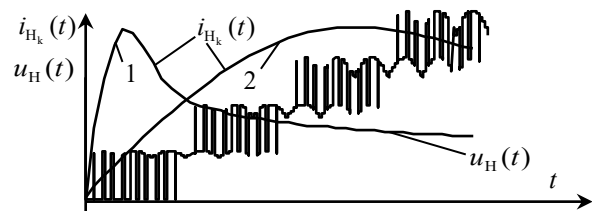


Рис. 2. Діаграми струмів кола якоря ДПС

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

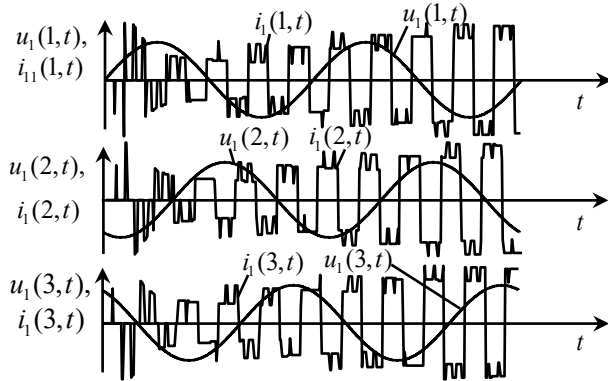


Рис. 3. Діаграми вхідних струмів i -х фаз мережі в координатах фазних напруг

Висновки за результатами дослідження. У цій роботі було виконано аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами. Також створено математичні моделі напівпровідникових перетворювачів з високо-частотним широтноїмпульсним регулюванням їх вихідної напруги при зміні параметрів навантаження в широких межах, які дозволили підвищити швидкодію електротехнологічних систем.

Список літератури

- 1 Макаренко М. П., Сенько В. І., Юрченко М. М. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу, К.: НАН України, ІЕД, 2005, 241 с.
- 2 Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. Kyiv, Ukraine, June 7–11, 2016. Pp. 45–48. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521887.
- 3 Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15404/techned2016.03.009>.
- 4 Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi0.5Sb1.5Te3 Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>.
- 5 Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
- 6 Mykhailenko V.V.; Buryan S.O.; Maslova T.B.; Mikhnenko G.E.; J.M Chunyk; Tcharniak O.S. Study of Electromagnetic Processes in the Twelve-Pulse Converter with Eight-Zone Regulation of Output Voltage and Electromechanical Load. *Proc. 6th IEEE International*

Conference on Energy Smart Systems ESS-2019. Kyiv, Ukraine, April 17–19, 2019. Pp. 43–46. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764227.

- 7 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.
- 8 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.
- 9 Zarri, 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.

References (tranliterated)

- 1 Makarenko N.P., Senko V.I., Yurchenko N.N. Systemnyi analiz elektromagnitnykh protsesiv u napivprovodnykovomykh peretvoruvachah elektronergii modulatsiogo typu [System analysis of electromagnetic processes in semiconductor converters of modulation type electricity], Kyiv.: National Academy of Science of Ukraine, Electrodynamics Institute, 2005, 241 p. [in Ukrainian].
- 2 Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. Kyiv, Ukraine, June 7–11, 2016. Pp. 45–48. DOI: 10.1109/IEPS.2016.7521887.
- 3 Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15404/techned2016.03.009>.
- 4 Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi0.5Sb1.5Te3 Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>.
- 5 Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
- 6 Mykhailenko V.V.; Buryan S.O.; Maslova T.B.; Mikhnenko G.E.; J.M Chunyk; Tcharniak O.S. Study of Electromagnetic Processes in the Twelve-Pulse Converter with Eight-Zone Regulation of Output Voltage and Electromechanical Load. *Proc. 6th IEEE International Conference on Energy Smart Systems ESS-2019*. Kyiv, Ukraine, April 17–19, 2019. Pp. 43–46. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764227.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Zarri, 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.

Надійшла (received) 12.03.2025

Відомості про авторів / About the authors

Михайленко Владислав Володимирович (Mikhaylenko Vladislav Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” м. Київ, тел.: 098-317-93-74, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0973-4612>, e-mail: VladislavMihailenko@i.ua.

Чуняк Юлія Михайлівна (Chuniak Julia Mikhailivna), асистент, кафедра теоретичної електротехніки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”; <https://orcid.org/0000-0002-4506-912X>, e-mail: j.chunyk@ukr.net

Пінда Андрій Володимирович (Pinda Andrii Volodymyrovych), студент, група ЕВ-11, кафедра теоретичної електротехніки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”