

В.В. МИХАЙЛЕНКО, Ю.М. ЧУНЯК, М.А. БРАГИНЕЦЬ, М.А. РИБОВАЛОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ШЕСТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

У даній роботі виконано моделювання електричних процесів у електричних схемах з напівпровідниковими елементами. Отримано нові моделі математичні для різних випадків в трифазних колах у напівпровідникових комутаторах при багатоланковим зонним управлінням напруг фаз приймаючи втрат енергії відсутніми у напівпровідникових пристроях для оцінювання наслідку впливу характеристик навантаження на значення і вид напруги на виході. Виконано побудову комп'ютерної моделі для дослідження процесів електромагнітних у напівпровідникових комутаторах для широтно-імпульсним управління напруги на виході. Показано діаграми, які ілюструють процеси електромагнітні в колах електричного виду. Робота дає змогу розвинути метод багатопараметричних функцій використовуючи створення різних математичних об'єктів і знаходження характеристик та виразів для дослідження за різними компонентами електромагнітних явищ у різноманітних схемах електричних при наявності напівпровідниковими компонентів та ділянками з напругами синусоїдального, постійного та імпульсного виду. Напівпровідникові компоненти зазвичай виконують високочастотне імпульсне перетворення структур електричних схем та широтно-імпульсне моделювання як фазних так і лінійних напруг мережі електроживлення трифазного виду, проводячи змінення напруг вихідних напівпровідникових пристроїв різних параметрів енергії електричної.

Ключові слова: електромагнітні характеристики; струм і напруга на виході; машина постійного струму; метод багатопараметричних рівнянь.

V.V. MYKHAILENKO, J.M. CHUNIYAK, M.A. BRAGYNETS, M.A. RYBOVALOV

STUDY OF A CONVERTER WITH SIX-CHANNEL VOLTAGE REGULATION AND ELECTRICAL MECHANICAL LOADING

In this work, modeling of electrical processes in electrical circuits with semiconductor elements was performed. New mathematical models were obtained for various cases in three-phase circuits in semiconductor switches with multi-link zone control of phase voltages, assuming energy losses to be absent in semiconductor devices for a quick assessment of the influence of load characteristics on the value and type of output voltage. A computer model was built to study electromagnetic processes in semiconductor switches for pulse-width control of output voltage. Diagrams illustrating electromagnetic processes in electrical circuits in the presence of semiconductor components and areas with sinusoidal, constant and pulsed voltages. Semiconductor components usually perform high-frequency pulse conversion of electrical circuit structures and pulse-width modeling of both phase and linear voltages of a three-phase power supply network, changing the voltages of output semiconductor devices of various parameters of electrical energy. Mathematical model of the semiconductor converter is also used for study of the connecting processes in semiconductor converter with actively-inductive load. The mathematical model of the converter is created for six zoned regulations of the output voltage. Article is devoted to the development of a method of multi-parametric modulating functions by means of working out of new mathematical models and definition of functions and the algorithmic equations for the analysis on sub-system components of electromagnetic processes in electric circuits of variable structure with sinusoidal, direct and pulsing voltage. Introduction of functions with discrete parameters in the algorithmic equations for analysis of processes in circuits with semiconductor commutators simplifies modeling on subsystem components. The mathematical model of electric circuits of thyristor shapers of electro-discharge pulses for the analysis and the matching of capacitors charging modes with decrease several times of electric resistance of technological load is also created.

Keywords: electromagnetic characteristics; output current and voltage; DC machine; multiparameter equation method.

Вступ. Рішення задач регулювання та стабілізації напруги має знаходитись виходячи з комплексу всіх чинників, що викликають дану проблему. Відхилення напруги мережі може провокуватись цілою низкою факторів і, як правило, характеризується багатосторонніми відношеннями. У більшості випадків аналіз електромагнітних та енергетичних процесів у таких системах проводять нехтуючи нелінійним характером її елементів, в також не враховуючи електромеханічних характеристик навантаження [1-9].

У роботах [1-4] подано конструкції перетворювачів частоти (ПЧ) з простим модулюванням для отримання кіл електроспоживання для каскадів діагностування електромеханічних приладів для різного вигляду енергії на виході. У цій роботі виконується моделювання аспекту застосування моделі ПЧ у електромеханічних ланувх з широтно-імпульсним регулюванням (ШІП) напруги постійної з шестизонним управлінням.

Метою роботи є дослідження явищ у електричних ділянках з комутаторами і розроблення комп'ютерної моделі перетворювача при навантаженні яке має

електромеханічний характер.

Дослідження електромагнітних характеристик.

Схему перетворювача проілюстрована на рис. 1. На якій показані: СМА, СМВ, СМС – модулятори силові (СМ) фазні А, В і С, ВВ – випрямляч високочастотний, Н – навантаження; D – двигун. СМ, яке мають підключення до мережі паралельно і мають з'єднання на виході послідовно, являє собою ділянку високої частоти схеми.

Електричне навантаження визначається динамікою процесів, що відбуваються під час експлуатації двигунів постійного струму (ДПС) й залежить від його технічного стану, потужності втрат енергії та умов охолодження. Зазначені фактори зумовлюють відхилення від нормальних режимів роботи двигуна, виникнення аварійно небезпечних режимів, пошкоджень та вихід машини з ладу.

При дослідженні моделі перетворювача з математичною орієнтацією її використання застосовано метод модулюючих характеристик [5], який застосовує представлення рівняння комутатора. При цьому взято такі допущення: мережа вхідна симетрична та її опір внутрішній нулю дорівнює, транзистори та діоди

інверторів випрямленої напруги (ІВН) взяті ідеальними ключами, трансформатори узгоджувальні у кожній зоні управління напруги на виході втрат не мають.

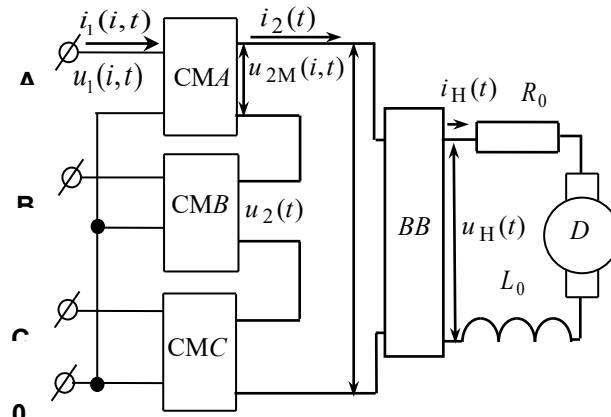


Рис. 1. Електричне коло НПП

Проведення дослідження дає можливість обґрунтувати структуру та розробити комп'ютерний комплекс, що дозволяє, з урахуванням зміни характеристик у колі якоря, оцінювати адекватність прогнозування паспортних даних, робочих параметрів та характеристик, температурних та вібраційних параметрів ДПС при його використанні в ході післяремонтних випробувань.

Напругу на споживачі визначаємо у вигляді

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{n=1}^{N=6} \sum_{i=1}^3 u_1(i,t) \psi_B(i,t) \psi(n,N,t) \psi_{BB}(t), \quad (1)$$

де $u_1(i,t)$ – значення напруг фаз мережі, $\psi_B(i,t)$ – характеристики синуса прямокутного, які мають співпадіння по часу з положенням напруг фазних, $n = 1, 2, \dots, N = 6$ – порядкові значення зон управління; $\psi(n,N,t)$ – це модулюючі характеристики i -х інверторів CM ; $\psi_{BB}(t)$ – змінна синуса прямокутного, яка має співпадіння по часу з напругою $u_2(t)$; k_T – трансформації коефіцієнт.

ДПС, який формує струм на виході НПП, задається системою рівнянь [4]

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

де $i_{H_k}(t)$, $i_{H_{k+1}}(t)$, $n_k(t)$, $n_{k+1}(t)$ – струм у якорі та швидкість кутового обертання ДПС для k -ого і $k+1$ -ого інтервалу відповідно; ε_{ch} , ε_a – падіння напруги відносні у щітках та обмотці якоря; ε_M , ε_{M0} – моменти опору відносні для валу; $c(t) = \frac{u_H(t)}{E}$ – величина

напруги відносна для якоря; $u_H(t)$ та E – миттєві величини напруги вихідної НПП та проти ЕРС відповідно; $a_1 = \varepsilon_a + \frac{2T_{ab}}{\Delta t}$, $a_3 = \varepsilon_M + \frac{2T_M}{\Delta t}$;

T_{ab} та T_M – постійні для часу двигуна електромагнітна і механічна, Δt – часові інтервали, за котрими виконуються розрахунки.

Система (2) вирішена використовуючи метод додавання з записуванням умов на початку при $t = 0$ і допущеннями лінійності зв'язку миттєвості опору валу двигуна відносно швидкості обертання [3] та кривої намагнічування лінеаризованої форми.

Графіки струмів на ділянці якоря ДПС при шести-зонному управлінні напруги на виході НПП показані на рис. 2. Графік 1 показує струм у колі якоря у пусковий момент ДПС під впливом напруги максимального ступеня (3), а графік 2 – це струм у колі якоря у момент пуску ДПС під впливом напруги (3) з шестизонним регулюванням широтно-імпульсного виду (ШІР) по лінійному закону.

Струм $i_2(t)$ визначаємо як

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

Струми $i_1(n,i,t)$ записані у вигляді

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

Для визначення струмів у i -х фазах на протязі всього діапазоні управління напруги на виході НПП проведемо додавання вхідних струмів ІВН, які приймають участь у регулюванні напруги на виході кожної з i -х фаз. Вираз для струмів i -х проводів мережі подано як

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

де $i_1(1,i,t)$, $i_1(2,i,t)$, $i_1(N,i,t)$ – струми на вході інверторів i -х фаз на ділянках першої, наступних до $N = 6$ -ї зон управління.

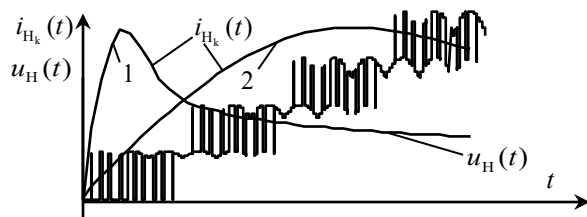


Рис. 2. Графіки струмів ДПС у колі якоря

Графіки струмів та напруг на вході, що отримані на основі (5), маємо на рис. 3.

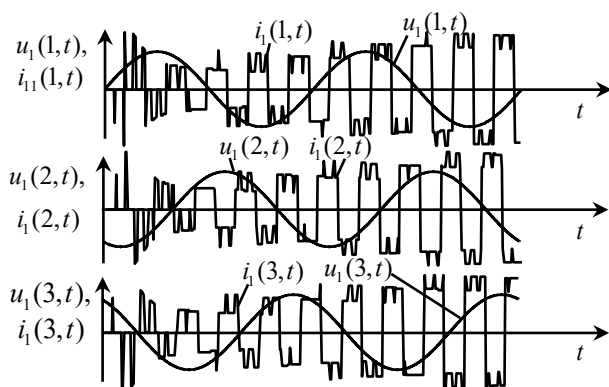


Рис. 3. Графіки струмів i -х фаз мережі у проекціях напруг фаз

Висновки за результатами дослідження. У даному дослідженні було проведено моделювання процесів у колах з напівпровідниковими комутаторами. Крім того побудовано математичні моделі комутаторів з широтноімпульсним регулюванням напруги на виході при змінній характеристик навантаження у широкому діапазоні, котрі дає можливість збільшити швидкість технологічних систем.

Список літератури

1. Кутін В.М., Вашковський В.В. Аналіз наявної системи діагностики електричних розрядних мереж і шлях до їх вдосконалення // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 4 – С. 31 – 35.
2. Денисюк С.П. Аналіз процесів енергообміну в системах з пристроями силової електроніки // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2000. – Ч. 8. – С. 15 – 18.
3. Von Altrach, “Fuzzy Logic and Neuro Fuzzy Applications explained”, ISBN 0-1336-8465-2. Prentice hall 1995. – 343 с.
4. Переверзев А.В., Василенко О.В. Застосування В-елементів для функціонально-логічного моделювання приладів та пристроїв силової електроніки // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. “Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2001. – Ч. 1. – С. 86 – 89.
5. Гончаров Ю.П., Будьоний О.В., Морозов В.Г. та ін. Перетворювальна техніка. – Підручник Ч.2 // За ред. В.С. Руденка. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
6. Afalian A., Linkens D.A. Training Neurofuzzy Power System Stabilizers using Genetic Algorithms // EPES, 22/2000. – P. 93 – 102.
7. Beernet S., Ponnalari S., Teichmann R. Design and Loss Comparison of Matrix Converters and Voltage-source Converters for Modern AC Drivers // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – vol. 49. No 2. April 2002. – P. 304 – 314.
8. Shidlovskiy A., Komarov N., Moskalenko G., Boiko P. Three-Phase Rectifier with Forced Formation of Sinusoidal Input Current for Electrotechnological Installations // 5th international conference Electrical Power Quality and Utilisation, September 15 – 17, 1999, Cracow, Poland. – P/ 443 – 452.
9. Al-Alawi S.M., Elithy K.A. Turning of SVC Damping Controlled over a Wide Range of Load Models using an Artificial Neural Networks // EPES, 22/2000. – P. 405 – 420.

References (transliterated)

1. Kutin V.M., Vashkovskiy V.V. Analiz naiavnoyi systemy diagnostyky electrychnykh rozriadnykh meshzh i shlyakh do ikh vdoskonalenia [Analysis of the existing system for diagnosing electrical discharge networks and the path to their improvement]. Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute. – 1999. – No 4 – P. 31 – 35.
2. Denysuk S.P. Analiz protsesiv energoobminu v systemakh z prystroyami sylovoi elektroniky [Analysis of energy exchange processes in systems with power electronics devices]. Technical Electrodynamics. Thematic issue. “Problems of Modern Electrical Engineering”. – 2000. – Part 8. – P. 15 – 18.
3. Von Altrach, “Fuzzy Logic and Neuro Fuzzy Applications explained”, ISBN 0-1336-8465-2. Prentice hall 1995. – 343 с.
4. Pereverzev A.V., Vasylenko O.V. Zastosuvania V-elementiv dlia funktsionalno-logichnogo modeliuvania prykladiv ta prystroiv sylovoi elektroniky [Application of B-elements for functional-logical modeling of power electronics devices and instruments]. Technical Electrodynamics. Thematic issue. “Power Electronics and Energy Efficiency”. – 2001. – Part 1. – P. 86 – 89.
5. Goncharov Y.P., Budionyi O.V., Morozov V.G. and others Peretvoriuvalna tekhnika [Transformational technology]. – Textbook Part 2. Ed. V.S. Rudenko. – Kharkiv: Folio, 2000. – 360 p.
6. Afalian A., Linkens D.A. Training Neurofuzzy Power System Stabilizers using Genetic Algorithms. EPES, 22/2000. – P. 93 – 102.
7. Beernet S., Ponnalari S., Teichmann R. Design and Loss Comparison of Matrix Converters and Voltage-source Converters for Modern AC Drivers. IEEE Transactions on Industrial Electronics. – vol. 49. No 2. April 2002. – P. 304 – 314.
8. Shidlovskiy A., Komarov N., Moskalenko G., Boiko P. Three-Phase Rectifier with Forced Formation of Sinusoidal Input Current for Electrotechnological Installations. 5th international conference Electrical Power Quality and Utilisation, September 15 – 17, 1999, Cracow, Poland. – P/ 443 – 452.
9. Al-Alawi S.M., Elithy K.A. Turning of SVC Damping Controlled over a Wide Range of Load Models using an Artificial Neural Networks. EPES, 22/2000. – P. 405 – 420.

Надійшла (Received) 08.04.2026

Прийнята (Accepted) 23.04.2026

Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

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

Чунак 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>.

Брагинець Микола Владиславович (Braginets Mykola) – студент, група ЕВ-21, кафедра теоретичної електротехніки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, ORCID <https://orcid.org/0009-0002-2289-8213>.

Рубовалов Михайло Андрійович (Rybovalov Mikhail) – студент, група ЕВ-21, кафедра теоретичної електротехніки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, ORCID <https://orcid.org/0009-0004-7151-0902>.