

DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.14

УДК 621.314

В.В. Михайленко, к.т.н., доцент, ggwwqq77@gmail.com

В.А. Святненко, ст. викладач, vasiksv@gmail.com

Ю.В. Перетятко, к.т.н., доцент

К.В. Трубіцин, ст. викладач

В.І. Бачинський, студент, vlad-gamer@ukr.net

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”, м. Київ

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ У ПОСТІЙНУ З СІМНАДЦЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ

Актуальність роботи зумовлена необхідністю застосування різних методів розрахунку ustalених станів у колах з перетворювачами. Необхідність використання цих методів визначаються доцільністю їх використання для досягнення високих енергетичних, динамічних, технічних і експлуатаційних характеристик напівпровідникових перетворювачів (НПП). Метою дослідження є розвиток методу багатопараметричних функцій у частині розробки нових математичних моделей перетворювачів. У роботі була створена математична модель перетворювача при підключенні до фазних напруг мережі живлення.

Ключові слова: метод багатопараметричних модулюючих функцій, вихідна напруга, струм мережі живлення, модуляція, зони регулювання.

The urgency of the work is due to the need to use different methods of calculating steady-state and transient processes in electrical circuits with semiconductor switches. The need to use these methods is determined by the feasibility of their use to achieve high energy, dynamic, technical and operational characteristics of semiconductor converters (SCC). The aim of the research is to study new models of converters. A mathematical model of the converter when connected to the phase voltages of the power supply network was created.

Keywords: method of multiparametric modulating functions, output voltage, mains current, modulation, control zones.

Постановка проблеми

Перспективи розвитку і масштаби застосування перетворювальних пристроїв визначається їх можливостями у забезпеченні необхідної якості заданих параметрів електроенергії за одночасного досягнення високих енергетичних, динамічних, технічних і експлуатаційних характеристик. Такі можливості мають безпосередні перетворювачі частоти, структурна, функціональна і принципова організація яких дозволяє реалізовувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії з великим ступенем уніфікації блоків та вузлів [1].

Ставиться задача створити математичну модель перетворювача з сімнадцятизонним зміненням сигналів. Застосування комутаторів у колах перетворювачів електроенергії вимагає ускладнення завдання дослідження процесів у цих контурах. Складнощі виникають при моделюванні процесів в розгалужених колах [1]. У роботах [2—6] проведено дослідження напівпровідникових перетворювачів (НПП) для діагностичних ретладів з різним типом сигналів. У цій статті виконується дослідження аспекту використання структури НПП для навантаження активно-індуктивного характеру з широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) напруги з сімнадцятизонним регулюванням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [1] детально досліджено сталі та перехідні процеси в колах перетворювачів напруги на основі трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС), які відрізняються високою якістю вихідної енергії, малими втратами та практичною відсутністю впливу комутатора на мережу електроживлення. Недоліками представлених в [6] методів розрахунку схем-

них рішень є складність, особливо при безперервному регулюванні режимів навантаження в широкому діапазоні змінени його опору. В роботах [2, 3] представлено принципи перетворення електричної енергії в базових схемах випрямлячів, інверторів, перетворювачів частоти та напруги. Також представлено основні характеристики всіх базових схем НПП і розглянуто способи управління НПП. Однак методи розрахунку представлених в [2] математичних моделей НПП з високочастотним ШПР вихідної напруги обмежені, тому побудова математичних моделей НПП з високочастотним ШПР напруги ємнісних накопичувачів є складною електротехнічною задачею.

В роботах [4—6] проведено аналіз, розрахунок і опис НПП пристроїв для заряду накопичувальних конденсаторів в системах енергопостачання імпульсних енергетичних установок; розглянуто області використання систем заряду накопичувальних конденсаторів, дана характеристика окремих ланок систем і способів заряду, приведено огляд схем перетворювачів у цих системах і методів аналізу електромагнітних процесів; розглядаються схемні рішення, які є оптимальними по критерію мінімуму маси при живленні від автономних джерел, наведено приклади розрахунку. Однак розрахунки вхідної напруги ємнісних накопичувачів технологічних систем в роботі [2] проведені достатньо складними методами. Таким чином доцільно продовжити розробку нових моделей перетворювачів для аналізу перехідних процесів у них.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є подальший розвиток методу багатопараметричних модулюючих функцій шляхом розробки математичних моделей напівпровідникових перетворювачів при підключенні їх до фазних напруг мережі живлення.

Виклад основного матеріалу

Схема перетворювача представлена на рис. 1. На ній позначені: СМА, СМВ, СМС — силові модулятори (СМ) фазних напруг A , B і C відповідно, ВВ — високочастотний випрямляч, N — навантаження. СМ підключені на вході паралельно і з'єднані на виході послідовно.

Всі СМ мають N інверторів випрямленої напруги (ІВН), де N — кількість інверторів.

При складанні моделі перетворювача впроваджено метод багатопараметричних модулюючих функцій [1], який виконує представлення компонентів дослідження. Було прийнято попередні врахування: мережа симетрична і її опір є нульовим, транзистори і діоди ІВН є ідеальними, трансформатори без втрат, а навантаження є активно-індуктивним.

При реалізації широтноімпульсного регулювання (ШПР) вихідної напруги напівпровідникового перетворювача силові ключі, за умов їхнього управління імпульсами напруги типу “меандр”, в найбільш загальному випадку приймають участь процесах перетворення енергії, а саме: у споживанні енергії навантаженням та у розсіянні енергії в контурі навантаження.

Метод багатопараметричних модулюючих функцій враховує реальне системне подання алгоритмів функціонування більшості пристроїв перетворювальної техніки, в тому числі і НПП параметрів електромагнітної енергії, коли процеси формування вихідних напруг можна подати алгоритмічними рівняннями, що відображають процеси одно- чи багатократної модуляції напруг первинної системи електроживлення (ПСЕЖ) різного роду еквівалентними модулюючими впливами. Еквівалентні модулюючі впливи, як зовнішні впливи з боку систем управління, представляються багатопараметричних модулюючих функцій, аргументами яких є системні параметри систем управління та час. Багатопараметричні модулюючі функції подаються знаковими функціями одичної амплітуди, які відображають у найпростішому випадку імпульси прямокутної форми, що реалізують в результаті різні види модуляції напруги. Зовнішні впливи з боку ПСЕЖ представляються багатопараметричними функціями, аргументами яких є системні параметри ПСЕЖ та час. Процеси модуляції подаються операціями множення зовнішніх впливів з боку ПСЕЖ на відповідні зовнішні впливи з боку систем управління. Процеси регулювання вихідних напруг та перехідні режими роботи НПП моделюються за рахунок відповідного подання. Багатопараметричних модулюючих функцій та напруг ПСЕЖ (якщо збурення в перехідних режимах імітуються по силовому каналу електроживлення).

На виході ІВН формується напруга

$$u_{2M}(p, i, t) = k_T u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (1)$$

де $i = 1, 2, 3$ — фазні номери; k_T — коефіцієнт передавання узгоджувальних трансформаторів, що входять до складу СМ; $p = 1, 2, 3, \dots, N$ — зонні номери; $\phi(i, t)$ — змінні, що за часом збігаються з напругами у фазах; $u_1(i, t)$ — миттєві значення вхідної напруги.

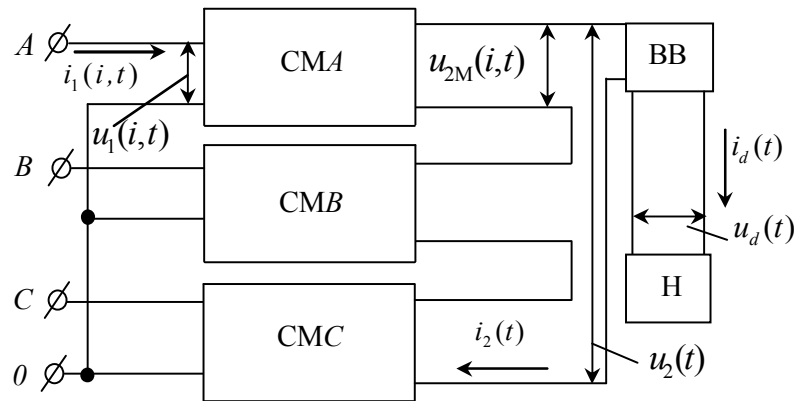


Рис. 1. Структурна схема перетворювача

Функції прямокутного сіноса визначаємо з виразу

$$\phi(i, t) = \text{sign} \left\{ \sin \left(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right\}, \quad (2)$$

а миттєві значення напруги мережі представлені як

$$u_1(i, t) = U_{1m} \sin \left(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right), \quad (3)$$

де U_{1m} — амплітудне значення напруги.

Модулюючі впливи визначаємо так

$$\psi(\alpha_p, t) = \frac{1}{2} \sum_2 \text{sign} \left[\sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \phi) \right], \quad (4)$$

де $\alpha_p(t)$ — кути ШПР, ϕ — початкова фаза модулюючих сигналів.

Вихідна напруга перетворювача $u_d(t)$ визначається рівнянням

$$u_d(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{p=1}^{17} \sum_{i=1}^3 u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t) v(t), \quad (5)$$

де $v(t)$ — змінна, що з напругою $u_2(t)$ збігається за часом.

$$v(t) = \text{sign}(u_2(t)). \quad (6)$$

При визначенні вихідної напруги на виході у (5) записуємо $u_1(i, t) \phi(\alpha_p, t) = |u_1(i, t)|$ і маємо вираз

$$u_d(t) = \frac{1}{2k_T} \sum_{p=1}^{17} \left(\sum_{i=1}^3 \left[U_{1m} \sin \left(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right] \cdot \left[\sum_2 \text{sign} \left[\sin(\omega_2 t \pm (\alpha_p/2) - \phi) \right] \right] \right). \quad (7)$$

З наведених діаграм видно, що вихідна напруга досягне максимальної величини за умови, що $\alpha_p(t) = 0$. Вираз для $u_d(t)$ прийме вигляд

$$u_d(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{p=1}^{17} \sum_{i=1}^3 \left| U_{1m} \sin \left(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right|. \quad (8)$$

Запишемо диференціальне рівняння для вихідного кола у вигляді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (9)$$

де y_0 — знаходимо з початкових умов; R і L — активний опір та індуктивність навантаження.

Розв'язок рівняння (9) для струму споживачів знаходимо як

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (10)$$

де: y — нульові припущення; $0, k$ — часовий проміжок; s — крок розв'язку; D — диференціальна змінна.

Вхідний струм ВВ знаходимо з виразу

$$i_2(t) = i_d(t)v(t). \quad (11)$$

У загальному виді вхідний струм перетворювача знаходимо з рівняння

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t)\psi(\alpha_p, t)\phi(i, t)}{3k_T}. \quad (12)$$

Графіки напруги і струму споживання подані на рис. 2.

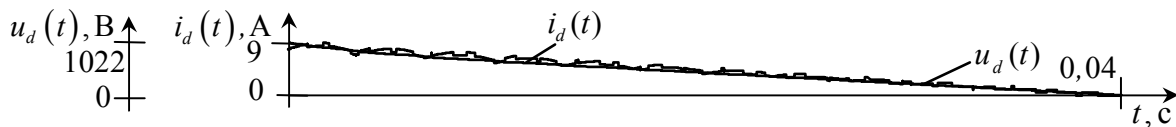


Рис. 2. Графіки напруги і струму споживання

Згідно з рівнянням (12) вираз для вхідних струмів перетворювача подамо як

$$i_1(i, t) = i_1(1, i, t) + i_1(2, i, t) + i_1(3, i, t) + \dots + i_1(17, i, t), \quad (13)$$

де $i_1(1, i, t)$, $i_1(2, i, t)$, $i_1(3, i, t)$, $i_1(4, i, t)$, ..., $i_1(17, i, t)$ — фазні струми у першій, другій, третій, четвертій та сімнадцятій зонах регулювання

Графіки напруг і струмів у фазах мережі показані на рис. 3.

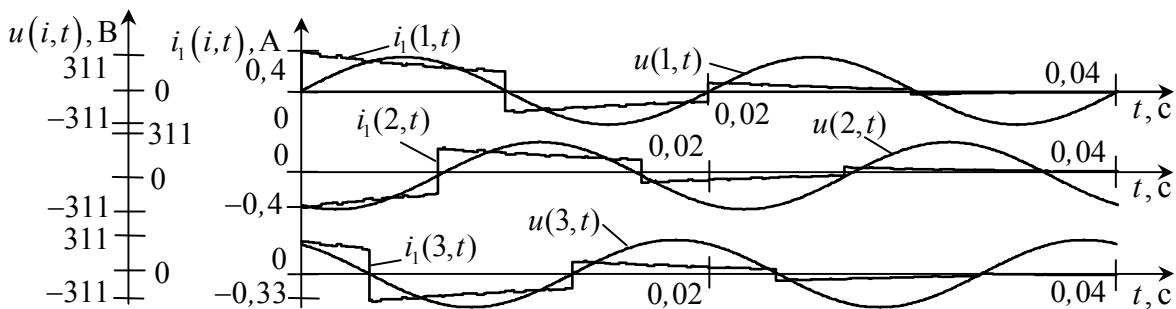


Рис. 3. Графіки напруг і струмів у фазах мережі

Висновки

У роботі було проведено дослідження процесів у колах з комутаторами. Було використано метод багатопараметричних модулюючих функцій для знаходження струму та напругу навантаження і вхідні струми дослідницького пристрою. Вдосконалено числові методики та проаналізовано змінні при дослідженні електричних кіл з напівпровідниковими перетворювачами.

Крім того, обґрунтовано застосування числових алгоритмів при дослідженні режимів. Це дає можливість покращити параметри на виході дослідницької установки.

В статті було узагальнено результати наукових та інженерних розробок авторів і їхніх наукових колективів по створенню ефективних методів комп'ютерного моделювання і аналізу електромагнітних процесів у перетворювачах електроенергії модуляційного типу.

У роботі показана ефективність системного аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах модуляційного типу за розробленими методами системного моделювання, які в роботі названі як: метод багатопараметричних модулюючих функцій та методиками моделювання електромагнітних процесів на їхній основі. Запропоновано узагальнені математичні моделі для аналізу перетворювачів з розгалуженими структурами, математичне забезпечення систем управління, нові структури інверторів напруги і алгоритми управління ними у перетворювачах зі змінними та постійними вихідними напругами. Розроблено теоретичні основи методу багатопараметричних функцій для аналізу напівпровідникових перетворювачів електроенергії відносно трифазної мережі живлення.

Список використаної літератури

1. Lee Y.H., Suh B.S., Hyun D.S. A novel PWM scheme for a three-level voltage source inverter with GTO thyristors. *IEEE Trans. Ind. Applicant.*, 1996, vol. 32, № 2, P. 260–268.
2. Suh B.S., Hyun D.S. A new N-level high voltage inversion system. *IEEE. Trans. Ind. Election*, 1997, vol. 44, № 1, P. 107–115.
3. Jiles A. Gabay S. High frequency resonant convertors for industry. *McGrawHill, Inc. Second edition*, New-York, 1998, P. 385.
4. Михайленко В.В., Чуняк Ю.М., Чарняк О.С., Математична модель перетворювача з чотиризонним регулюванням вихідної напруги і електромеханічним навантаження, *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Одеса: Одеський національний політехнічний університет. № 27(103). 2018. С. 17–23. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2018.32.10>.
5. Михайленко В.В., Святненко В.А., Чуняк Ю.М., Чарняк О.С., Дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі з одинадцятизонним регулюванням напруги. *Енергетика, економіка, технології, екологія*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. № 2. 2019. С. 69–75. doi: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2019.190025>.
6. Щерба А.А., Супруновська Н.І, Щерба М.А., Михайленко В.В., Використання методу багатопараметричних функцій для аналізу перехідних процесів в електричних колах змінної структури. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2020. Вип. 56. С. 11–15. doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.011>

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE CONVERTER OF THREE-PHASE VOLTAGE INTO A CONSTANT WITH SEVENTEEN VOLTAGE REGULATION

Mykhailenko V., Svyatnenko V., Peretyatko J., Trubitsyn K., Bachynskiy V.

Abstract

The urgency of the work is due to the need to use different methods of calculating steady-state and transient processes in electrical circuits with semiconductor switches. The need to use these methods is determined by the feasibility of their use to achieve high energy, dynamic, technical and operational characteristics of semiconductor converters (SCC). The aim of the research is to study new models of converters. The work is devoted to the questions of improving effectiveness of electric power semiconductor transducer devices. The process of end-to-end design of semiconductor power reformers, like any other electronic device, includes design stages at the structural, functional, circuit, component, design and technological levels. The feature of descending designing is the opportunity of

implementation of structural and functional creation in advanced environment automated schematic designing. It has been offered the new way of such creation, methods of ascending designing have been developed and realized. Principles of analog macro models construction for power elements and control system devices of semiconductor converters, which are intended for hierarchical designing with multilevel modeling by uniform software, are considered. The developed macro models and new methods of the analysis allow to reduce expenses of time at modeling. Flexible procedure of transition from one kind of model to another allows to combine profundity of the analysis with its comprehensiveness and choose alternately exactness or quickness of modeling as required. The task of developing methods for designing transducers by numerical methods and forming libraries of macro models of basic elements and devices of transducers of various levels of detail from structural level models to functional and circuit macro models is quite relevant, from physical to macro model formation is quite relevant. Solving these problems will allow computer modeling at different levels of design (structural, functional and circuit) by different numerical methods.

References

- [1] Lee, Y.H., & Suh, B.S., & Hyun, D.S. (1996). A novel PWM scheme for a three-level voltage source inverter with GTO thyristors. *IEEE Trans. Ind. Applicant.*, vol. 32, no. 2, P. 260–268.
- [2] Suh, B.S., & Hyun, D.S. (1997). A new N-level high voltage inversion system. *IEEE. Trans. Ind. Election*, vol. 44, no. 1, P. 107–115.
- [3] Jiles A. & Gabay S. (1998). High frequency resonant convertors for industry. *McGrawHill, Inc. Second edition*, New-York, P. 385.
- [4] Mykhailenko V.V., & Chuniyak J.M., & Charhyak O.S. (2018). Matematychna model peretvoruvacha z chotyryzonnym reguluvannyam vyhidnoi napruhy i elecromekhanichnym nanantadzennyam.[Mathematical model of the converter with four-zone regulation of output voltage and electromechanical loading]. *Electrical and computer systems. Number 27(103)*. P. 17–23. Odessa: *ONPU*. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2018.32.10>. [in Ukrainian].
- [5] Mykhailenko, V.V., & Svyatnenko, V.A., & Chuniyak, J.M., & Charhyak, O.S. (2019). Doslidzenya electromagnitnykh procesiv u peretvoruvachi z odyadtsyatyzonnym reguluyvannyam napruhy. [Investigation of electromagnetic proesses in a converter with eleven-zone voltage regulation]. *Energy, economics, technology, ecology. Number 2*. P. 69–75, Kyiv: *Sikorskiy polytechnic institute*. doi: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2019.190025>. [in Ukrainian].
- [6] Scherba, A.A., & Suprunovska, H.I., & Scherba, M.A., & Mykhailenko, V.V. (2020). Vykorydtannya metodu bagatoparmetrychnykh funktsiy dlya analizu perekhidnykh protsesiv v electrichnykh kolakh zminnoi struktury. [Using the method of multiparameter functions for the analysis of transients in electrical circuits of variable structure] *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Issue 56*. P. 11–15 Kyiv: *National Academy of Sciences of Ukraine* doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.011>. [in Ukrainian].