

**В.В. Михайленко**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-0973-4612

**В.А. Святненко**, старший викладач, ORCID 0000-0002-0518-1045

**Ю.М. Чуняк**, асистент, ORCID 0000-0002-4506-912X

**О.В. Петрученко**, старший викладач, ORCID 0000-0002-4982-4217

**В.І. Бачинський**, студент

Національний технічний університет України

”Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ У ПОСТІЙНУ З ШІСТНАДЦЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ

*Метою роботи є використання методу багатопараметричних функцій для аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами.*

*У цій статті проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах напівпровідниковими з комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах. Стаття присвячена розвитку метода багатопараметричних функцій шляхом розробки нових математичних моделей та визначення функцій і алгоритмічних рівнянь для аналізу за підсистемними складовими електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і ланками з синусоїдальними, постійними і імпульсними напругами. Широкому використанню напівпровідникових перетворювачів у електричних колах сучасних перетворювачів параметрів електроенергії значно ускладнюються задачі аналізу електромагнітних процесів. Найбільші ускладнення виникають при необхідності моделювання усталених і перехідних процесів у розгалужених колах змінної структури, в ланках з реактивними елементами якої виникають синусоїдні, постійні та імпульсні напруги.*

**Ключові слова:** електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм, багатопараметричні модулюючі функції, напівпровідникові комутатори, моделювання.

Тенденції 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. У роботах [1-9] 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 в якості ланки високої частоти, що стосується побудови й аналізу перетворювачів для комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШПР) напруги.

Схема напівпровідникового перетворювача (НПП) показана на рис. 1. На структурній схемі позначено: *СМ1* і *СМ2* – блоки силових модуляторів фазних і лінійних напруг відповідно; *ВВ1* і *ВВ2* – високочастотні випрямлячі фазних і лінійних напруг; *СК* – система керування і *Н* – навантаження, яке має активно-індуктивний характер. Кожний з блоків *СМ* має у своєму складі випрямлячі та інвертори, навантажених на узгоджувальні трансформатори.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використаємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [2], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди інвертора випрямленої напруги (ІВН) представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної напруги не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно-індуктивний характер.

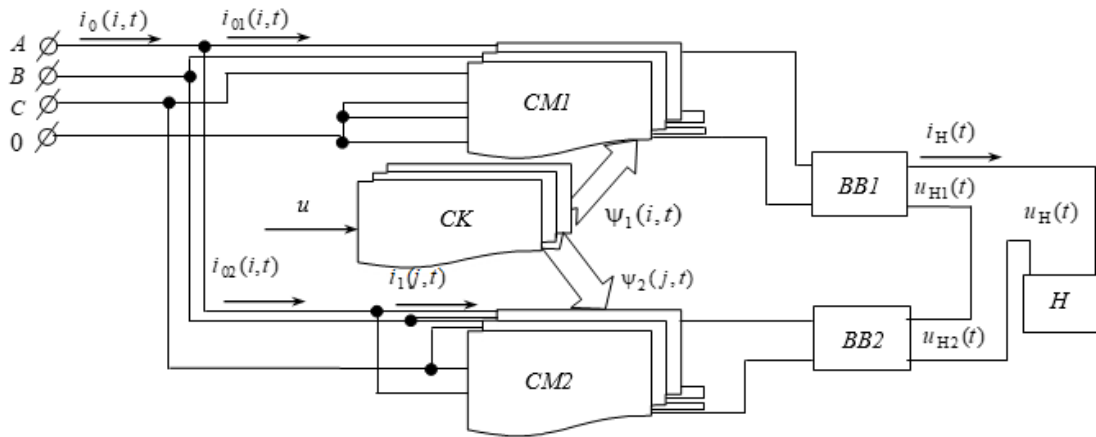


Рисунок 1– Структурна схема НПП

Алгоритмічне рівняння перетворювача записано у публікації [2]:

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \left( \sum_{n=1}^{N=8} \sum_{i=1}^3 u_{11}(i,t) \phi_1(i,t) \psi_1(i,t) v_1(t) + \sum_{n=1}^{N=8} \sum_{j=1}^3 u_{12}(j,t) \phi_2(j,t) \psi_2(j,t) v_2(t) \right), \quad (1)$$

де:  $i = 1, 2, 3$  і  $j = 1, 2, 3$  – номери фазних і лінійних напруг енергетичної мережі відповідно;  $k_T$  – коефіцієнт трансформації трансформаторів;  $\psi_{B1}(i,t)$  і  $\psi_{B2}(j,t)$  – модулюючі функції, які співпадають за часом з фазними і лінійними напругами;  $u_{11}(i,t)$  і  $u_{12}(j,t)$  – миттєві значення лінійних напруг;  $v_1(t)$  і  $v_2(t)$  – еквівалентні модулюючі впливи  $BB1$  і  $BB2$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots, N$  – номери зон регулювання вихідної напруги;

$N$  – кількість ІВН в кожному СМ;  $\psi_{A1}(i,t) = \text{sign} \left[ \sin \left( \omega_1 t - \varphi - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right]$  – модулюючі функції, які співпадають за часом з положенням відповідних фазних напруг мережі живлення;

$\psi_{B2}(j,t) = \text{sign} \left[ \sin \left( \omega_1 t - \varphi + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right) \right]$  – модулюючі функції, які співпадають за часом з положенням відповідних лінійних напруг мережі живлення;

$u_{01}(i,t) = E_m \sin \left( \omega_1 t - \varphi - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right)$  – миттєві значення вхідних фазних напруг мережі живлення,

$u_{02}(j,t) = E_m \sin \left( \omega_1 t - \varphi + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right)$  – миттєві значення вхідних фазних напруг мережі живлення,  $E_m$  – амплітудне значення фазної напруги;  $\omega_1 = 2\pi f_1$  і  $\varphi$  – відповідно кругова частота і початкова фаза напруги живлення;

$\psi_1(i,t)$  – множина еквівалентних модулюючих впливів  $j$ -х СМ,  $\psi_2(j,t)$  – множина еквівалентних модулюючих впливів  $j$ -х СМ.

Струм на навантаженні перетворювача знайдемо, як реакцію одноконтурного RL-ланцюга на дію напруги  $u_H(t)$

$$i_H(t)R + L \frac{di_H(t)}{dt} = u_H(t), \quad (2)$$

де:  $R$  і  $L$  – відповідно активний опір і індуктивність навантаження.

Рішення (2) відносно струму навантаження визначимо числовим методом за допомогою функції `odesolve` математичного процесора MATHCAD

$$i_H(t) = \text{odesolve}(t, k, p), \quad (3)$$

де:  $t$  – час;  $k$  – часовий інтервал;  $p$  – кількість точок на часовому інтервалі.

Діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача, побудовані за (3) для шістнадцятизонного регулювання представлені на рис. 2.

Фазні струми  $i_{01}(i, t)$  знаходимо з виразу

$$i_{01}(i, t) = \frac{\sum_{n=1}^{N=8} i_H(t) \psi_{B1}(i, t) \psi_1(i, t) v_1(t)}{k_T}. \quad (4)$$

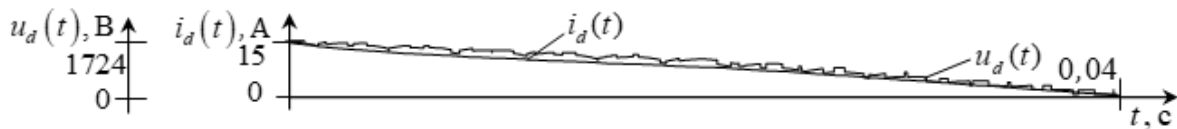


Рисунок 2 – Діаграми струму та напруги навантаження

Лінійні струми  $i_{12}(j, t)$  знаходимо з виразу виду

$$i_{12}(j, t) = \frac{\sum_{n=1}^{N=8} i_H(t) \psi_{B2}(j, t) \psi_2(j, t) v_2(t)}{k_T}. \quad (5)$$

Фазні струми  $i_{02}(i, t)$  знаходимо з співвідношень

$$i_{02}(1, t) = i_{12}(1, t) - i_{12}(3, t); \quad i_{02}(2, t) = i_{12}(2, t) - i_{12}(1, t); \quad i_{02}(3, t) = i_{12}(3, t) - i_{12}(2, t). \quad (6)$$

Вхідні фазні струми енергетичної мережі у кожній  $i$ -й фазі знаходимо з виразу:

$$i_0(i, t) = i_{01}(i, t) + i_{02}(i, t). \quad (7)$$

Діаграми вхідних фазних струмів перетворювача в координатах напруг енергетичної мережі, побудовані за (7), представлені на рисунку 3.

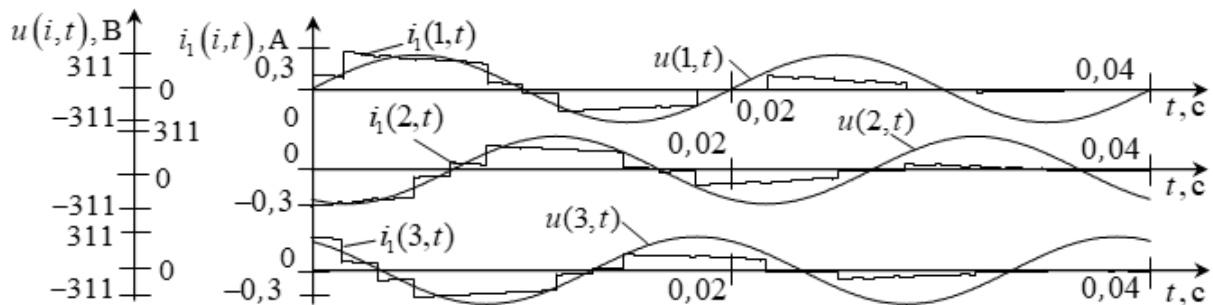


Рисунок 3 – Діаграми вхідних струмів  $i$ -х фаз мережі в координатах фазних напруг

Для аналізу частотних властивостей перетворювача було проведено спектральний аналіз вхідних струмів перетворювача. На рис. 4 показано спектр одного з вхідних струмів  $i_0(f)$  перетворювача у відносних одиницях.

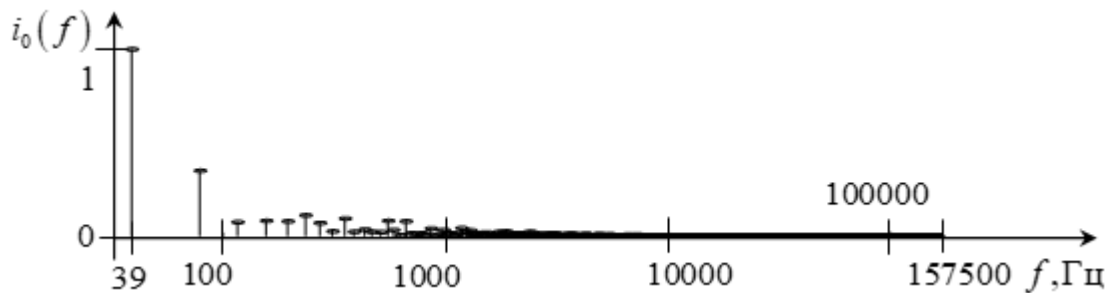


Рисунок 4 – Спектр одного з вхідних струмів перетворювача

На рис. 4 по вертикальній осі показано струм на вході перетворювача у відносних одиницях, а горизонтальній осі – спектр частот у логарифмічному масштабі.

**Результати роботи.** Показані результати досліджень показують ефективність подання математичної моделі перетворювача відносно напруги навантаження, струму навантаження і струмів, що споживаються з вхідної мережі узагальнюючими функціями багатопараметричного виду. Окрім наведених співвідношень і діаграм розроблена модель дозволяє аналізувати форми напруг і струмів на виході окремих СМ, а також їх елементах у процесі зонного регулювання вихідної напруги перетворювача.

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

У роботі було проведено спектральний аналіз вхідних струмів перетворювача. З графіку на рис. 4 видно, що найбільша гармоніка у перетворювачі є з частотою 39 Гц, наступна гармоніка має частоту близько 90 Гц з величиною 0,38, наступні гармоніки інша мають величини не більші 0,15, а після частоти 1000 Гц гармонічні складові струму значно менші 0,1.

**Висновки.** У роботі було виконано аналіз 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.

Підтверджено доцільність використання програмного пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів та оптимізації параметрів напівпровідникових перетворювачів. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

Розроблено нову математичну модель усталених і перехідних процесів у електричних колах напівпровідникових перетворювачів модуляційного типу з багатоканальним зонним використанням фазних напруг трифазної мережі живлення без урахування втрат електроенергії у комутаторах на першому етапі моделювання для спрощення розрахунків і швидкої оцінки впливу параметрів навантаження на характеристики регульованих вихідних синусоїдних і постійних напруг.

Такий підхід забезпечує швидке визначення алгоритмів управління комутаторами при підключенні напівпровідникових перетворювачів до фазних та лінійних напруг мережі живлення та підвищення якості знакопостійних напруг при багатозонному регулюванні вихідної напруги. При порівнянні з математичними моделями наведеними у [7-8] похибка розрахунків складала, що дозволяє говорити, що цей метод підходить для швидкої оцінки НПП та режимів його роботи.

#### Список літератури

1. Mykhailenko V, Mikhnenko., G., Charnyak O., “Study of the electromagnetic processes in converter with three zoned regulations of the voltage”, Адаптивні системи автоматичного управління, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, №2, 2019, С. 48-53, doi: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.35.2019.197430>.

2. Розіскулов С. С., Михайленко В. В., Перетятко Ю. В., “Регулювання тривалості перехідних процесів у напівпровідникових формувачах біполярних розрядних імпульсних струмів”, Технічна електродинаміка, Київ: ІЕД НАНУ, № 4, 2016, С. 41 – 43, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.041>.

3. Сенько В. І., Михайленко В. В., Юрченко М. М., Юрченко О. М., Чуняк Ю. М., “Аналіз електромагнітних процесів у колах з напівпровідниковими перетворювачами з сімнадцятизонним регулюванням вихідної напруги”, Технічна електродинаміка, Київ: ІЕД НАНУ, № 5, 2016, С. 23 – 25, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.023>.

**V.V. Mihaylenko**, PhD in Technical Sciences, assistant professor, ORCID 0000-0002-0973-4612

**V.A. Sviatnenko**, senior teacher, ORCID 0000-0002-0518-1045

**J.M. Chuniyak**, assistant teacher, ORCID 0000-0002-4506-912X

**O.V. Petruchenko**, senior teacher, ORCID 0000-0002-4982-4217

**V.I. Bachinskiy**, student

**National Technical University Of Ukraine ”Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

### INVERTER MATHEMATICAL MODEL THREE-PHASE VOLTAGE TO DC WITH SIXTEEN ZONE REGULATION VOLTAGE

*Analysis of the electromagnetic processes is organized beside this article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis electro-magnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. The brought graphs, which reflect the electromagnetic processes in electric circuit. Method much parametric functions was used when performing calculation. The mathematical model of the converter is created for fifteen 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 subsystem 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 steady-state processes and transients in electric circuits of semiconductor converters of modulation type with multi-channel zonal use of phase and line voltages of a three-phase network of power supplies is developed. 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. The obtained results have a great value for development theoretical electrical engineering in a direction of simplification of calculations of electromagnetic processes in electric circuits with semi-conductor converters of the electric power. The Electromagnetic processes in electric circuit under width-pulse regulation possible to analyse with use the algorithmic equations multivariable function, which argument are a system parameters semiconductor commutator, signal of control, phases to network of the power supply and time. Introduction multivariable function with discrete parameter in algorithmic equations of the analysis formed and connecting processes in electric circuit of the variable structure allows to reflect change of this structure under system components, simplifying modeling and analysis of such processes to account of the generalization of the got equations. Except specified correlations and diagrams designed model allows to analyse forms of the output voltages and current of the separate power modules.*

**Key words:** *electromagnetic processes, output voltage and current, multi parametric modulating functions, semiconductor commutators, modeling.*

1. Mykhailenko V, Mikhnenko, G., Chamiyak O., “Study of the electromagnetic processes in converter with three zoned regulations of the voltage”, Adaptive automatic control systems, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, №2, 2019, P. 48-53, doi: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.35.2019.197430> (Eng.).

2. Roziskulov S. S., Mykhailenko V. V., Peretyatko Y. V., “Regulation of transient duration in semiconductor shapers of bipolar discharge pulse currents, Technical electrodynamics, Kyiv: IED NASU, № 4, 2016, P. 41 – 43, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.041> (Ukr.).

3. Senko V. I., Mykhailenko V. V., Yurchenko N. N., Yurchenko O. N., Chuniyak J. M., “ Analysis of electromagnetic processes in circuits with semiconductor converters with seventeen-zone output voltage regulation”, Technical electrodynamics, Kyiv: IED NASU, № 5, 2016, P. 23 – 25, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.023> (Ukr.).

Надійшла 15.06.2021

Received 15.06.2021