

Михайленко Владислав Володимирович, канд. тех. наук, доцент;

Тел. +38(044) 2 36 79 89; E-mail: VladislavMihailenko@i.ua

Святненко Вадим Анатолійович, канд. тех. наук, доцент

Чуняк Юлія Михайлівна, канд. тех. наук, доцент

Ходасевич Валерія Олегівна, асистент

Майкович Ірина Віталіївна, асистент

Наухацька Таміла Анатоліївна, асистент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37. Київ, Україна, 03056

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ДВАДЦЯТИДВОХЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Практика якісного перетворення електричної енергії свідчить про можливість використання в установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшою від частоти змінної напруги промислової мережі. Обґрунтовано доцільність застосування методу багатопараметричних функцій з використанням пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами. Наведено результати аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Побудовано графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах.

Запропоновано математичну модель перетворювача із комп'ютерною орієнтацією, що створена за допомогою методу багатопараметричних модулюючих функцій, який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача.

Наведено результати аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами. Запропоновано удосконалений метод багатопараметричних функцій в частині розробки нової математичної моделі з багатозонним регулюванням вихідної напруги та визначення модулюючих функцій для аналізу електричних кіл з напівпровідниковими комутаторами.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм.

Михайленко Владислав Володимирович, канд. тех. наук, доцент;

Тел. +3 8044 236 7989; E-mail: VladislavMihailenko@i.ua

Святненко Вадим Анатольевич, канд. тех. наук, доцент

Чуняк Юлія Михайлівна, канд. тех. наук, доцент

Ходасевич Валерія Олегівна, асистент

Майкович Ірина Віталіївна, асистент

Наухацька Таміла Анатоліївна, асистент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37. Київ, Україна, 03056

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ПОЛУПРОВІДНИКОВОМУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛІ С ДВАДЦЯТИДВОХЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХОДНОГО НАПРЯЖЕННЯ

Практика якісного перетворення електричної енергії свідчить про можливість використання в установках звено високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшою від частоти змінної напруги промислової мережі. Обґрунтовано доцільність застосування методу багатопараметричних функцій з використанням пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами. Наведено результати аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідного напруги. Побудовано графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах.

Предложено математическая модель преобразователя с компьютерной ориентацией, созданная при помощи метода багатопараметричних модулюючих функцій, который предполагает предварительное представление алгоритмического уравнения преобразователя.

Приведены результаты анализа электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми преобразователями. Предложен усовершенствованный метод многопараметрических функций в части разработки новой математической модели с багатозонним регулюванням вихідного напруги и определение модулирующих функций для анализа электрических цепей с полупроводниковыми коммутаторами.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, выходное напряжение и ток.

Mikhailenko Vladislav Vladimirovich, cand. teh. sciences, associate Professor;

Tel.+38(044) 2 36 79 89; E-mail: VladislavMikhailenko@i.ua

Svyatnenko Vadim, cand. teh. sciences, associate Professor

Cunjak Julia M., cand. teh. sciences, associate Professor

Khodasevich, Valeria Olegovna, assistant

Maikovich Irina Vitalievna, assistant

Nowacka Tamila Anatolyevna, assistant

National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute name of Igor Sikorskiy», Pobedy Ave., 37. Kyiv, Ukraine, 03056

ANALYSIS OF ELEKTROMAGNETIC PROCESSES IN SEMICONDUCTOR CONVERTER WITH TWENTY-SECOND ZONA REGULATION OF THE OUTPUT VOLTAGE

Practice high-quality conversion of electric energy indicates the possibility of use in installations of the high frequency link with a switching frequency of the valves is considerably greater frequency of the AC voltage industrial network. The expediency of application of the method of multivariable functions using MATHCAD for the analysis of electromagnetic processes in electric chains with semiconductor converters. The results of the analysis of electromagnetic processes in electric chains with semiconductor switches. The mathematical model for the analysis of electromagnetic processes in semiconductor converters with pulse-width regulation of the output voltage. Graphs reflecting the electromagnetic processes in electric circuits.

A mathematical model of the Converter with computer orientation, created using the method bahatoformatne modulating functions that involves a preliminary understanding of algorithmic equations of the Converter.

The results of the analysis of electromagnetic processes in electric chains with semiconductor converters. Proposed an improved method of multiparameter functions in the development of new mathematical models with baatsona adjustment of the output voltage and determining the modulating functions for the analysis of electric circuits with semiconductor switches.

Key words: electromagnetic processes, output voltage and current.

Вступ

Практика якісного перетворення електричної енергії свідчить про можливість використання в установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшою від частоти змінної напруги промислової мережі.

У роботах [1-10] показана доцільність використання структур перетворювачів частоти (ПЧ) з однократною модуляцією при побудові систем вторинного електропостачання для комплексів діагностики електромеханічних пристроїв із різноманітними видами вхідної енергії.

У даній роботі проведено аналіз аспекту використання тієї ж структури ПЧ в якості ланки високої частоти, що стосується побудови й аналізу перетворювачів з широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при двадцятидвохзонному керуванні.

Метою роботи є застосування методу багатопараметричних функцій з використанням пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами.

Основна частина

Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних напруг А, В і С відповідно, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження.

Сукупність СМ, підключених до енергетичної мережі паралельно і з'єднаних по виходу послідовно, представляє собою ланку високої частоти перетворювача.

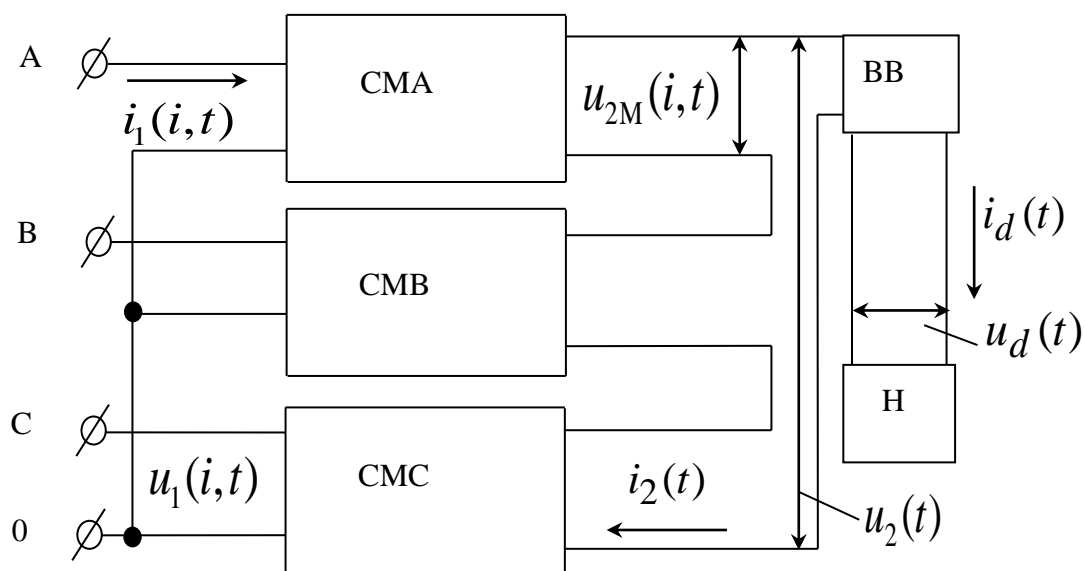


Рис. 1. Структурна схема перетворювача

Таким чином кожен СМ має в своєму складі N інверторів випрямленої напруги (ІВН), де N – це число інверторів.

При складанні математичної моделі перетворювача із комп'ютерною орієнтацією використаємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [2], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача.

При цьому приймаємо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди ІВН представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно-індуктивний характер.

Дана структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, при якому в СМ здійснюється розгалужена модуляція миттєвих значень попередньо випрямлених фазних напруг $u_1(i,t)$, частоти ω_1 , трифазної енергетичної мережі відповідними еквівалентними модулюючими впливами $\phi(\alpha_p,t)$, частоти ω_2 .

В результаті такої операції на виході кожного з ІВН формується напруга

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

де:

- $i = 1, 2, 3$ – номери фаз енергетичної мережі;
- k_T – коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора;

- $p = 1, 2, 3, \dots, n$ – номери зон регулювання вихідної напруги;
- $\phi(i, t)$ – функції прямокутного сінуса, співпадаючі за часом з положенням відповідних фазних напруг мережі;
- $u_1(i, t)$ – миттєві значення вхідної напруги мережі.

Функції прямокутного сінуса подаються як

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

а миттєві значення вхідної напруги мережі представлені у вигляді

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

де:

- U_{1m} – амплітудне значення фазної напруги.

Еквівалентні модулюючі впливи подаються виразом

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

де:

- $\alpha_p(t)$ – кути керування, за рахунок зміни яких забезпечується ШПР вихідної напруги перетворювача;
- φ – початкова фаза еквівалентних модулюючих впливів.

Вихідна напруга $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача, згідно з його структурною організацією, відповідно з виразом (1), представляється сумою

$$u_2(t) = \sum_{p=1}^{22} \sum_{i=1}^3 k_T u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (5)$$

а вихідна напруга перетворювача $u_d(t)$, як випрямлена напруга (5), знаходимо з виразу

$$u_d(t) = \sum_{p=1}^{22} \sum_{i=1}^3 k_T u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t) v(t), \quad (6)$$

де:

- $v(t)$ – функція прямокутного сінуса, співпадаюча за часом з положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача.

$$v(t) = \text{sign}(u_2(t)) \quad (7)$$

Струм навантаження знайдемо, як реакцію одноконтурного RL-ланцюга на дію напруги (7). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо у вигляді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (8)$$

де:

- y_0 – визначається з початкових умов; R і L – відповідно активний опір і індуктивність навантаження.

Розв’язок (8) відносно струму навантаження визначаємо чисельним методом у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (9)$$

де:

- y – вектор початкових умов;
- $0, k$ – часовий інтервал рішень;
- s – кількість точок на часовому інтервалі рішень;
- D – вектор функція диференціальних рівнянь.

Вхідний струм високочастотного випрямляча має вигляд

$$i_2(t) = i_d(t)v(t) \quad (10)$$

Для визначення вхідних струмів інверторів i -х фаз для кожної p -ї зони регулювання врахуємо, що $i_2(t)$ протікає в загальному контурі всіх СМ, утвореному послідовно з’єднаними вторинними обмотками узгоджувальних трансформаторів і приймаємо до уваги алгоритмічне рівняння (6) і те, що (2),(4) і (7) є функціями одиничної амплітуди.

При цьому в загальному вигляді

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t)\psi(\alpha_p, t)\phi(i, t)}{k_T} \quad (11)$$

Для визначення струмів i -х фаз енергетичної мережі у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги виконаємо підсумовування вхідних струмів інверторів всіх зон регулювання в кожній з i -ї фази.

Враховуючи рівняння (11) загальний вираз для струмів i -х фаз енергетичної мережі має вигляд

$$i_1(i, t) = \sum_{p=1}^{22} i_1(n, i, t) \quad (12)$$

Часові діаграми струму та напруги навантаження та вхідних струмів i -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (6), (9) та (12) для двадцятидвохзонного регулювання, представлені на рис. 2.

Для того, щоб знайти амплітудні значення струмів, які протікають через силові транзистори ІВН, достатньо проаналізувати струми первинних обмоток узгоджувальних трансформаторів, що знаходяться в колах живлення силових транзисторів.

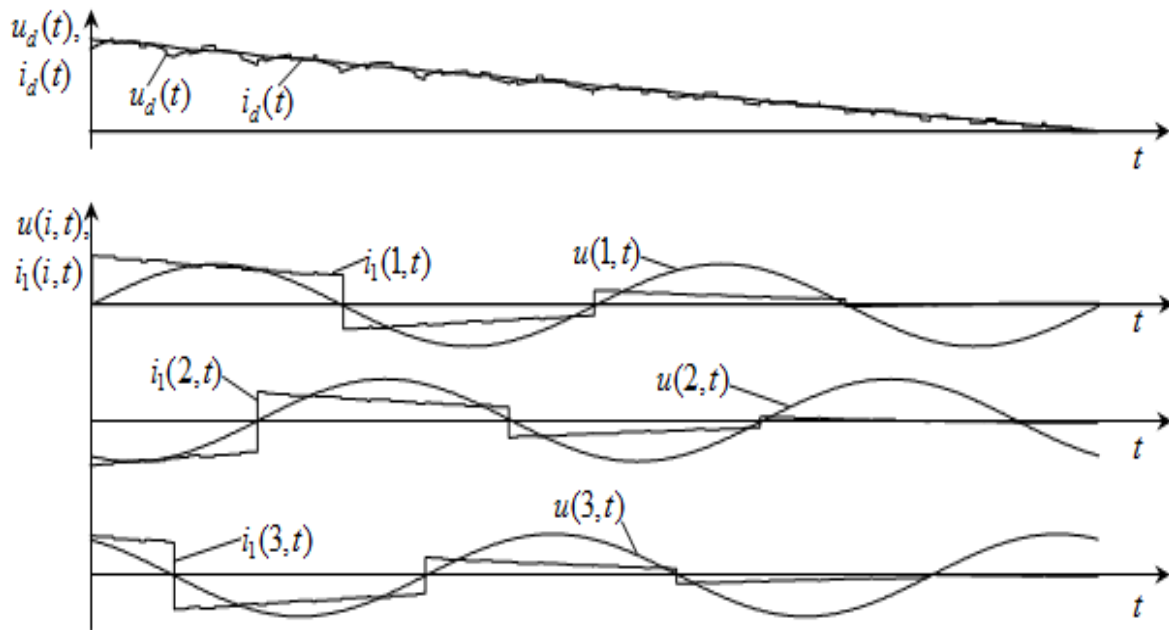


Рис. 2. Часові діаграми струму та напруги навантаження та вхідних струмів i -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг

Висновки

У даній роботі було виконано аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими перетворювачами. Використовуючи метод багатопараметричних модулюючих функцій було знайдено струм і напругу навантаження, а також вхідні струми перетворювачів.

У роботі розвинуто метод багатопараметричних функцій в частині розробки нової математичної моделі з багатозонним регулюванням вихідної напруги та визначення модулюючих функцій для аналізу електричних кіл з напівпровідниковими комутаторами.

Використання методу багатопараметричних модулюючих функцій у електричних колах змінної структури є доцільним, якщо в їх ланках є не більше трьох незалежних реактивних елементів.

Данні розрахунків порівняно з даними експериментів не відрізняється більше ніж на 1 %.

Список використаної літератури:

1. Макаренко М. П. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу / М. П. Макаренко, В. І. Сенько, М. М. Юрченко – К.: НАН України, ІЕД, 2005. – 241 с.
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. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч. 1. – С. 19–22.
3. Макаренко М. П. Деякі аспекти комп'ютерного аналізу напівпровідникових перетворювачів електроенергії з багаторозгалуженими структурами / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн.

- електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2004. – Ч. 1. – С. 112–115.
4. Макаренко М. П. Деякі аспекти системного аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Вестн. НТУ "Харківський політехнічний інститут". "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – 2005. – Вип. 45. – С. 384–385.
 5. Shakweh Y. Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drives applications / Y. Shakweh, E. A. Lewis // Proc. IEEE-PESC'99 Conf. – 1999. – P.590–595.
 6. Wheeler P. W. The Technology and Potential of Matrix Converters / P. W. Wheeler, J. C. Clare, L. Empringham, M. Bland // Power Electronics Europe. – 2001, № 5. – P. 25–28.
 7. Gyugyi L. Static Power Frequency Changers / L. Gyugyi, B. R. Pelly – New York, NY: Wiley. – 1976. – 442 p.
 8. Sinha G. A four level inverter based drive with a passive front end / G. Sinha, T.A. Lipo // Proc. IEEE-PESC'99 Conf. – 1999. – P.590–595.
 9. Pena R. A doubly-fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine / Pena R., Clare J. C., Asher G. M. // Proc. IEE. – 1996. – Part B, Vol. 143, № 5. – P. 380–387.
 10. Holmer L. Analysis, design and implementation of the space-vector modular for forced-commutated cycloconverters / L. Holmer, D. Borojevic // IEE Proceedings-B. – 1992, – Vol. 139, №2. – P.103–113.

References:

1. Makarenko, M. P., Senko, V. I., Yurchenko, M. M. (2005), *Sistemnyi analiz elektromagnitnyh procesiv u napivprovodnykovykh peretvoruvachah electroenergii modulacynogo typu*, National academy of the sciences of the Ukraine, Institute of electrodinamiks Publ., Kyiv, Ukraine, 241 p.
2. Makarenko, M. P. Mihaylenko, V. V. (2002), "Analiz elektromagnitnyh procesiv u peretvoruvachah z bagatozonnym reguljuvannjam vuhidnoji naprugy funkciyamy bagatoparametruchnogo vydu", *Technicheskaia elektrodinamika. Silova elektronika i energoefektivnist. Thematic vypusk. Publ., Kyiv, Ukraine, Part 1*, P. 19–22.
3. Makarenko, M. P., Mihaylenko, V.V. (2004), "Deyaki aspekty kompyuternogo analizu napivprovodnykovykh peretvoruvachiv electroenergii z bagatorozgaludgenymy strukturamy", *Technicheskaia elektrodinamika. Silova elektronika i energoefektivnist. Thematic vypusk Publ., Kyiv, Ukraine, Part 1*, P. 112–115.
4. Makarenko, M. P., Mihaylenko, V. V. (2005), "Deyaki aspekty systemnogo analizu elektromagnitnyh procesiv u napivprovodnykovykh peretvoruvachah electroenergii", *Herald national technical "Harikovskiy polytechnic institute". "Problems automated electrodrive. Theory and practice"* Publ., Kharkiv, Ukraine, Vol. 45, P. 384–385.
5. Shakweh, Y., Lewis, E.A. (1999), "Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drives applications", *Proc. IEEE – PESC ' 99 Conf. Publ., London , England*, P.590–595.
6. Wheeler, P. W., Clare, J.C., Empringham L., Bland M. (2001), "The Technology and Potential of Matrix Converters", *Power Electronics Europe Publ., London, England, № 5*, P. 25–28.
7. Gyugyi, L., Pelly, B. R. (1976), *Static Power Frequency Changers*, NY. Wiley, New York, 442 p.
8. Sinha, G. A., Lipo, T.A. (1999), "A four level inverter based drive with a passive front end", *Proc. IEEE-PESC'99 Conf.*, P.590–595.
9. Pena, R., Clare, J. C., Asher, G. M. (1996), "A doubly-fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine", *Proc. IEE.*, Part B, Vol. 143, № 5, pp. 380–387.
10. Holmer, L., Borojevic, B. D. (1992), "Analysis, design and implementation of the space-vector modular for forced-commutated cycloconverterlmer", *IEE Proceedings*, Vol. 139, №2, pp.103–113.

Прийнята до друку 15.12. 2019