

РОЗДІЛ V. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.3.011.74.005

Владислав Михайленко, Олег Петрученко, Руслан Рокицький, Юлія Язенюк

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ДВАДЦЯТИЧОТИРИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Владислав Михайленко, Олег Петрученко, Руслан Рокицький, Юлія Язенюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ДВАДЦАТИЧЕТЫРЁХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Vladyslav Mihaylenko, Oleg Petruchenko, Ruslan Rokyttskyi, Julia Jazenok

RESEARCH ON THE ELECTRIC MAGNETIC PROCESSES IN SEMICONDUCTOR CONVERTER WITH TWENTY FOURTH ZONED REGULATION OF THE OUTPUT VOLTAGE

Проведено аналіз електромагнітних процесів у електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси в електричних колах. Проведено системний аналіз електромагнітних процесів у модуляційному напівпровідниковому перетворювачі з двадцятичотиризонним регулюванням вихідної напруги з активно-індуктивним навантаженням. Досліджено електромагнітні процеси у напівпровідниковому перетворювачі модуляційного типу. Ключові елементи були прийняті ідеальними.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм, напівпровідниковий перетворювач.

Рис.: 3. Бібл.: 3.

Проведен анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создана математическая модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Приведены графики, которые отражают электромагнитные процессы в электрических цепях. Проведен системный анализ электромагнитных процессов в модуляционном полупроводниковом преобразователе с двадцатичетырёхзонным регулированием выходного напряжения с активно-индуктивной нагрузкой. Исследованы электромагнитные процессы в полупроводниковом преобразователе модуляционного типа. Ключевые элементы были приняты идеальными.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, выходные напряжение и ток, полупроводниковый преобразователь.

Рис.: 3. Библ.: 3.

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. The system analysis of the electromagnetic processes is organized in inflexion of the semiconductor converters with twenty fourth zoned regulations of the output voltage with actively-inductive load. Study of the electromagnetic processes is organized in work in semiconductor converter inflexion type. Key element were ideal.

Key words: electromagnetic processes, output voltage and current, semiconductor converter.

Fig.: 3. Bibl.: 3.

Вступ. Розвиток напівпровідникової техніки дозволяє використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою перемикання вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі. У роботах [1–3] 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 цій роботі проводиться аналіз аспекту використання тієї ж структури ПЧ як ланки високої частоти, що стосується побудови й аналізу перетворювачів для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при двадцятичотиризонному керуванні.

Метою роботи є використання методу багатопараметричних функцій з використанням пакета MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів у електричних колах з напівпровідниковими комутаторами з двадцятичотиризонним регулюванням вихідної напруги.

При широтно-імпульсному регулюванні вихідної напруги перетворювача силові ключі інверторів напруги за умов їхнього управління імпульсами напруги типу «меандр» беруть участь у двох процесах перетворення енергії, а саме – у споживанні енергії навантаженням (у провідному стані знаходяться відповідні пари транзисторів інвертора напруги) та розсіянні енергії в контурі навантаження (у провідному стані знаходяться відповідні пари, що складаються з транзисторів та діодів).

Структурна схема напівпровідникового перетворювача (НПП) показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних напруг A , B і C відповідно; ВВ – високочастотний випрямляч; Н – навантаження. Сукупність СМ, підключених до енергетичної мережі паралельно і з'єднаних по виходу послідовно, являє собою ланку високої частоти перетворювача.

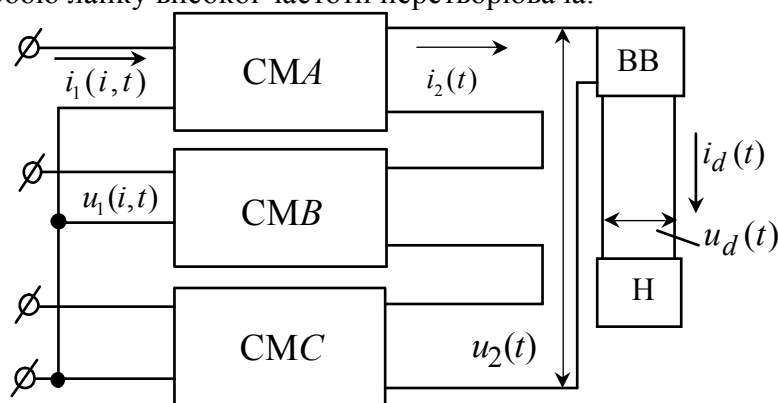


Рис. 1. Структурна схема перетворювача

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

Під час складання математичної моделі перетворювача із комп'ютерною орієнтацією її застосування використовуємо метод багатопараметричних модулюючих функцій, який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому прийємо 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.

Така структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, за якого у СМ здійснюється розгалужена модуляція миттєвих значень попередньо випрямлених фазних напруг $u_1(i, t)$, частоти ω_1 , трифазної енергетичної мережі відповідними еквівалентними модулюючими впливами $\psi(p, N, t)$, частоти ω_2 . У результаті такої операції на навантаженні формується напруга $u_d(t)$

$$u_d(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{p=1}^{24} \sum_{j=1}^3 u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(p, N, t) \nu(t), \quad (1)$$

де $i = 1, 2, 3$ – номери фаз енергетичної мережі; k_T – коефіцієнт трансформації трансформатора; $p = 1, 2, 3, \dots, N$ – номери зон регулювання; $\phi(i, t)$ – функції прямокутного

синуса, що збігаються за часом з положенням фазних напруг мережі; $u_1(i, t)$ – миттєві значення вхідної напруги мережі.

Функції прямокутного синуса подаються як

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

а миттєві значення вхідної напруги мережі представлені у вигляді

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

де U_{1m} – амплітудне значення фазної напруги; $v(t)$ – функція прямокутного синуса, яка збігається за часом з положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача

$$v(t) = \text{sign}(u_2(t)). \quad (4)$$

Струм навантаження знайдемо, як реакцію одноконтурного RL -ланцюга на дію напруги (4). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо у вигляді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (5)$$

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

Рішення (5) відносно струму навантаження визначимо числовим методом у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (6)$$

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

Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача, побудовані за виразом (7) для двадцятичотиризонного регулювання, представлені на рис. 2.

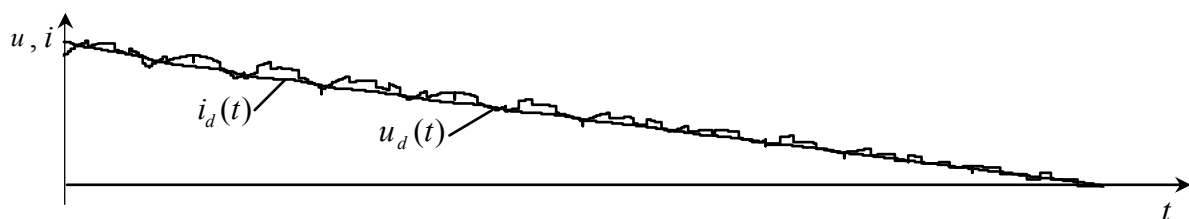


Рис. 2. Часові діаграми струму і напруги навантаження та вхідних струмів інверторів у координатах фазних напруг енергетичної мережі

Вхідний струм високочастотного випрямляча має вигляд

$$i_2(t) = i_d(t)v(t). \quad (7)$$

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.

$$i_1(p, i, t) = \frac{i_2(t)\psi(p, N, t)\phi(i, t)}{k_T}. \quad (8)$$

Для визначення струмів i -х фаз енергетичної мережі у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги виконаємо додавання вхідних струмів інверторів всіх зон регулювання в кожній i -й фазі. Враховуючи рівняння (8) загальний вираз для струмів i -х фаз енергетичної мережі подамо у вигляді

$$i_1(i, t) = \sum_{i=1}^{24} i_1(p, i, t), \quad (9)$$

де $i_1(p, i, t)$ – вхідні струми інверторів i -х фаз для p -ї зони регулювання.

Часові діаграми вхідних струмів i -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (9) для двадцятичотиризонного регулювання, представлені на рис. 3.

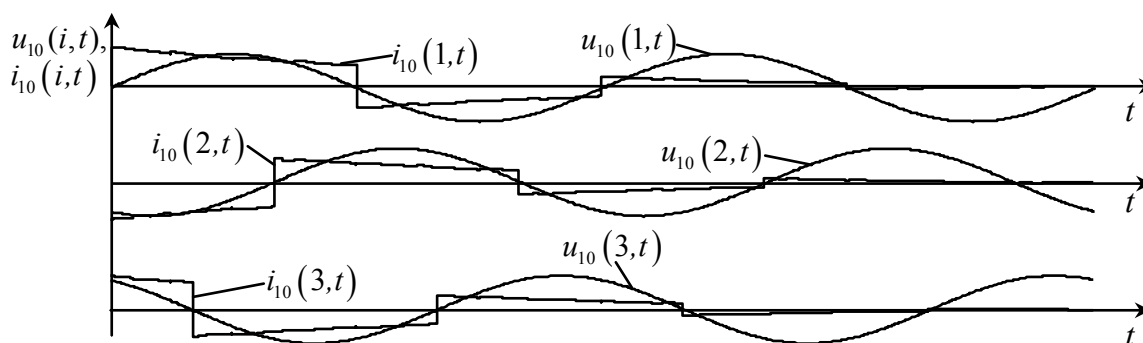


Рис. 3. Часові діаграми вхідних струмів i -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг

Дослідження показують ефективність використання багатопараметричних модулюючих функцій для моделювання і розрахунку електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатозонним високочастотним широтноімпульсним регулюванням їхньої вихідної напруги при живленні RL-навантаження.

Крім указаних співвідношень і діаграм, розроблена модель дозволяє аналізувати форми вихідних напруг і струмів окремих силових модулів. Показано, що в електричних колах перетворювачів з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги доцільно використовувати інвертори для формування проміжної високочастотної напруги. Багатопараметричні функції треба визначати з дискретними параметрами, які в алгоритмічних рівняннях аналізу електромагнітних процесів у колах змінної структури з напівпровідниковими комутаторами відображають її змінення за підсистемними складовими. Це спрощує моделювання та аналіз електромагнітних процесів у колах за рахунок узагальнення системи рівнянь для множин цих складових і елементів при дії зовнішніх факторів.

Використання багатопараметричних модулюючих функцій у математичних моделях електромагнітних процесів у електричних колах з напівпровідниковими комутаторами дозволяє формалізовано визначати струми в колах інверторів та інших напівпровідникових ланок кожного із силових модулів випрямлених напруг. Також формалізовано можна визначати алгоритми управління комутаторами в колах силових модуляторів лінійних напруг трифазної мережі електроживлення, що спрощує підвищення якості знакопостійних напруг у процесі формування та багатозонного регулювання вихідних синусоїдних і знакопостійних напруг.

На другому етапі аналізу можна провести уточнення попередніх досліджень, беручи до уваги нові припущення, наприклад, відносно неідеальності внутрішніх опорів ключових елементів.

Подальші уточнення під час моделювання процесів можуть відноситись до урахування внутрішніх параметрів мережі живлення щодо їхніх еквівалентних опорів та індуктивностей, зміни внутрішніх параметрів навантаження та комплексного аналізу процесів щодо впливів можливих зовнішніх та внутрішніх факторів.

Висновки і пропозиції. Підтверджено доцільність використання програмного пакета MATCAD для аналізу електромагнітних процесів та оптимізації параметрів напівпровідникових перетворювачів. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

У подальшому можна провести моделювання у декілька етапів з різними початковими припущеннями, розглядаючи НПП як систему зі своєю структурною побудовою, що визначає внутрішні впливи, в середовищі надсистеми зі своїми системами, які ззовні впливають на НПП.

Розвинуто метод багатопараметричних модулюючих функцій у частині розробки нових математичних моделей і алгоритмічних рівнянь відносно функцій із системними дискретними параметрами напівпровідникових комутаторів, напруг і кутів управління, фаз мережі живлення і часу для аналізу електромагнітних процесів у електричних колах змінної структури з напівпровідниковими комутаторами та ланками із синусоїдними та постійними напругами.

Це спрощує системний аналіз усталених і перехідних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідникових перетворювачів з високочастотним широтно-імпульсним регулюванням їх вихідних напруг.

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

Такий підхід забезпечує швидке визначення алгоритмів управління комутаторами при підключенні напівпровідникових перетворювачів до лінійних напруг мережі живлення та підвищення якості знакопостійних напруг при багатозонному регулюванні вихідної напруги.

Список використаних джерел

1. Макаренко М. П. Математична модель перетворювача трифазної напруги в постійну напругу / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // *Електроніка и связь*. – 2002. – № 14. – С. 73–75.
2. Патент 18750. України. МПК H02M 1/02. Інвертор напруги / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко, В. В. Пілінський ; заявник та власник патенту НТУУ “КПІ”. – завл. 31.05.2006, опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.
3. Патент 20985. України. МПК H02M 1/02. Модулятор випрямленої напруги / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко ; заявник та власник патенту НТУУ “КПІ”. – завл. 18.09.2006, опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.

References

1. Makarenko, M.P., Mikhailenko, V.V. (2002). Matematichna model peretvoriuvacha trifazno napruhy v postiinu napruhu [Mathematical model of three-phase voltage transformer in a constant voltage]. *Elektronika i sviaz – Electronics and communications*, no. 14, pp. 73–75 (in Ukrainian).
2. Makarenko, M.P., Mykhailenko, V.V., Pilinskyi, V.V. (2006). *Invertor napruhy [Voltage inverter]*. Patent Ukraine 18750.
3. Makarenko, M.P., Mykhailenko, V.V. (2007). *Modulator vypriamlanoi napruhy [Modulator rectified voltage]*. Patent Ukraine 20985.

Михайленко Владислав Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Михайленко Владислав Володимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

Mihaylenko Vladyslav – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Pulpit Theoretical Electrical Engineers, National Technical University of the Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: VladislavMihailenko@i.ua

Петрученко Олег Васильович – старший викладач кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Петрученко Олег Васильович – старший преподаватель кафедры теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

Petruchenko Oleg – senior teacher of the pulpit theoretical electrical engineers, National Technical University of the Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: ovpetruchenko@gmail.com

Рокицький Руслан Олександрович – студент, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Рокицький Руслан Олександрович – студент, Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” (проспект Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

Rokytskyi Ruslan – student, National Technical University of the Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: ruslan.rokitskii@mail.ru

Язенок Юлія Сергіївна – студентка, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Язенок Юлия Сергеевна – студентка, Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

Jazenok Julia – student, National Technical University of the Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: julia.okss@gmail.com