

УДК 621.3.011.74.005

Михайленко Владислав Володимирович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри теоретичної електротехніки. E-mail: VladislavMihailenko@i.ua, мобільний телефон: 098-317-93-74

Чуняк Юлія Михайлівна, асистент кафедри теоретичної електротехніки

Чупак Віктор Вікторович, студент кафедри технології машинобудування, мобільний телефон: 097-868-06-35.

Ковальчук Дмитро Володимирович, студент кафедри конструювання станків і машин, мобільний телефон: 067-123-47-01.

Тимовесва Ірина Андріївна, студентка кафедри електромеханіки

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна. Пр-т Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ШЕСТИЗОННИМ РЕГІЮЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

У статті проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу перехідних процесів у напівпровідникових перетворювачах з електромеханічним навантаженням. Наведено графіки, що відображають перехідні процеси у електричних колах. У роботі також виконано розвиток методу багатопараметричних модулюючих функцій для зрощення аналізу перехідних процесів у електричних колах без врахування втрат у ключевих елементах.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм.

Михайленко Владислав Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической электротехники E-mail: VladislavMihailenko@i.ua, мобильный телефон: 098-317-93-74

Чуняк Юлия Михайловна, ассистент кафедры теоретической электротехники

Чупак Виктор Викторович, студент кафедры технологии машиностроения, мобильный телефон: 097-868-06-35.

Ковальчук Дмитрий Владимирович, студент кафедры конструирования станков и машин, мобильный телефон: 067-123-47-01

Тимовеева Ирина Андреевна, студентка кафедры электромеханики

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина. Пр-т Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ШЕСТИЗОННЫМ РЕГИРОВАНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

В статье проведено анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создано математическую модель для анализа переходных процессов в полупроводниковых преобразователях с электромеханической нагрузкой. Приведены графики, что отображают переходные процессы в электрических цепях. В работе также выполнено развитие метода многопараметрических модулирующих функций для упрощения анализа переходных процессов в электрических цепях без учета потерь в ключевых элементах.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, выходные напряжение и ток.

Mihaylenko Vladislav Volodymyrovych, PhD in Technical Sciences, senior teacher of the pulpit theoretical electrical engineers. E-mail: VladislavMihailenko@i.ua, mobile telephone: 098-317-93-74.

Chunyak Julia Mihaylivna, assistant of the pulpit theoretical electrical engineers.

Chupak Viktor Viktorovych, student of the pulpit to technologies of machine building, mobile telephone: 097-868-06-35.

Kovalichuk Dmytro Volodymyrovych, student of the pulpit конструирования tool and machines, mobile telephone: 067-123-47-01.

Timoveeva Iryna Andriivna, student of the pulpit electric mechanical engineers

National technical university of the Ukraine "Kyiv pollytechnic institute", Kyiv, Urraina. avenue of the Peremogy, 37, Kyiv, Urraina, 03056,

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN SEMICONDUCTOR CONVERTER WITH SIX ZONES BY REGULATION OF THE OUTPUT VOLTAGE AND ELECTROMECHANICAL LOAD

Abstract: In article is organized analysis of the electromagnetic processes in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis of the connecting processes in semiconductor converter with electromechanical load. The brought graphs that display the connecting processes in electric circuit. In work is also executed development of the method multivariable modulating function for simplification of the analysis of the connecting processes in electric circuit disregarding losses in key element.

Keywords: electromagnetic processes, output voltage and current.

Вступ

Перетворення електричної енергії, а також успіхи у розвитку напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою перемикання вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі [1–5].

Порівняльні дослідження техніко-економічних показників різного виду виконавчих елементів слідкуючих систем на основі високомоментних двигунів постійного струму (ДПС) серій 2П та ПВ і трифазних асинхронних двигунів серії 4А, які випускаються промисловістю серійно, показують, що за умови однакових показників за масою та габаритами в діапазоні потужностей від 100 Вт до 500 кВт, у слідкуючих системах доцільніше використовувати ДПС, що дозволяє підвищити продуктивність технологічних процесів. При цьому швидкодія та динамічна точність слідкуючих систем в основному визначаються функціональними можливостями напівпровідникових перетворювачів (НПП) електроенергії у процесах формування та регулювання їхніх вихідних напруг.

У роботах [2, 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 даній роботі проводиться аналіз аспекту використання тієї ж структури для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при восьмизонному керуванні.

Метою роботи є виконання аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами та розробка математичної моделі напівпровідникового перетворювача з електромеханічним навантаженням.

Матеріал і результати досліджень

Особливістю НПП з багатозонним регулюванням вихідної напруги є багаторозгалуженість внутрішніх структур їхніх силових частин та систем управління (СУ). Так, силова частина НПП, навіть за умов однозонного регулювання вихідної напруги, має три мостових інвертори випрямлених напруг (ІВН) мережі живлення, кожний з яких містить по дві стійки на ключах постійного струму. Середовище містить: первинну систему електроживлення, власне НПП, як систему перетворення енергії, СУ та ДПС, як систему, що має свої особливості. Тобто, система в основному залежить від зовнішніх впливів на неї, які задаються з боку первинної системи електроживлення (ПСЕЖ), СУ та навантаження.

Структурна схема перетворювача наведена на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних напруг А, В і С відповідно, ВВ – високочастотний випрямляч, навантаження D – двигун постійного струму. Сукупність СМ, підімкнених до енергетичної мережі паралельно і з'єднаних на виході послідовно, представляє собою ланку високої частоти перетворювача.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використовуємо метод багатопараметричних модулюючих функцій, 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 інверторів випрямленої напруги (ІВН) представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної напруги не мають втрат.

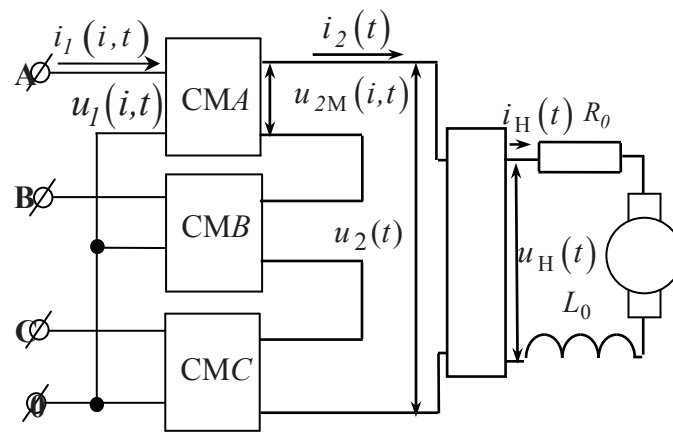


Рис. 1. Структурна схема НПП

Вихідну напругу НПП знаходимо з виразу виду

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

де $u_i(i,t)$ – миттєві значення вхідних фазних напруг мережі живлення;

$\psi_B(i,t)$ – функції прямокутного синуса, що співпадають за часом з положенням відповідних фазних напруг мережі;

$n = 1, 2, 3, \dots, N=6$ – номери зон регулювання вихідної напруги;

$\psi(n,N,t)$ – множина еквівалентних модулюючих впливів i -х інверторів СМ;

$\psi_{BB}(t)$ – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти НПП;

k_T – коефіцієнт трансформації вихідних трансформаторів СМ.

ДПС, що задає вихідний струм НПП, описується системою алгебраїчних рівнянь, яка подає миттєві значення струму кола якоря та його кутової швидкості з урахуванням пускового режиму у вигляді

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

де: $i_{H_k}(t), i_{H_{k+1}}(t), n_k(t), n_{k+1}(t)$ – струм якоря та кутова швидкість обертання ДПС на k -ому та в $k+1$ -ому інтервалі відповідно;

$\varepsilon_{ch}, \varepsilon_a$ - відносні падіння напруги на щітках і обмотці якоря;

$\varepsilon_M, \varepsilon_{M0}$ – відносні моменти опору на валу;

$c(t) = \frac{u_H(t)}{E}$ – відносне значення напруги на якорі;

$u_H(t)$ та E – відповідно миттєві значення вихідної напруги НПП та проти ЕРС;

$$a_1 = \varepsilon_a + \frac{2T_{ab}}{\Delta t}, \quad a_3 = \varepsilon_M + \frac{2T_M}{\Delta t};$$

T_{ab} та T_M - електромагнітна та механічна постійні часу двигуна, Δt – інтервали часу, за якими проводяться розрахунки процесів.

Система (2) вирішується за допомогою методу припасовування з попереднім записом початкових умов при $t = 0$ та припущеннями відносно лінійної залежності моменту опору на валу двигуна від швидкості обертання і лінеаризованої кривої намагнічування.

Діаграми струмів кола якоря ДПС для випадку восьмизонного регулювання вихідної напруги НПП наведені на рис. 2. Крива 1 відображає струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією максимальної величини напруги (3), а крива 2 – струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією напруги (3) з шестизонним широтно-імпульсним регулюванням (ШІР).

Вихідний струм $i_2(t)$ визначаємо з співвідношення

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

Вхідні струми $i_l(n, i, t)$ знаходимо з виразу

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

Для визначення струмів i -х фаз мережі у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги НПП підсумуємо вхідні струми ІВН, що беруть участь у процесі регулювання вихідної напруги в кожній з i -ї фази. Загальний вираз для струмів i -х фаз мережі подамо у вигляді

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

де: $i_l(1, i, t)$, $i_l(2, i, t)$, $i_l(N, i, t)$ – вхідні струми інверторів i -х фаз на інтервалах першої, другої, та N -ї зони регулювання.

Діаграми вхідних струмів та напруг, побудовані за (5), представлені на рис. 3.

Для структурної організації НПП з високочастотним широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги доцільно використовувати ІВН для формування проміжної високочастотної напруги, які формують проміжну високочастотну напругу. При цьому для моделювання та аналізу процесів регулювання напруги у силовому тракті попереднього формування постійної напруги ефективним є застосування математичної моделі процесу формування вихідної напруги, розробленої на основі методу багатопараметричних модулюючих функцій, тому що без використання цього методу ми не можемо формалізовано знайти струми через транзистори ІВН.

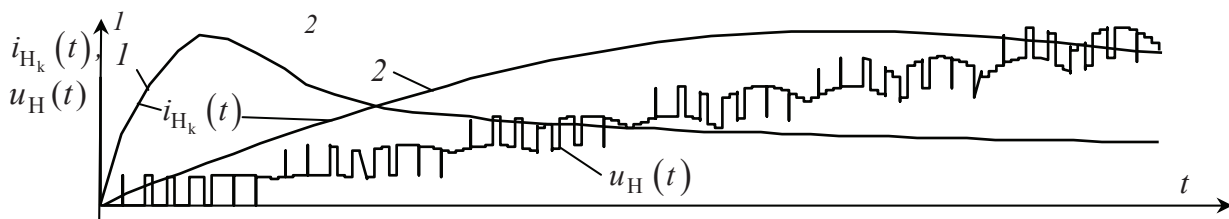


Рис. 2. Діаграми струмів і напруг кола якоря ДПС

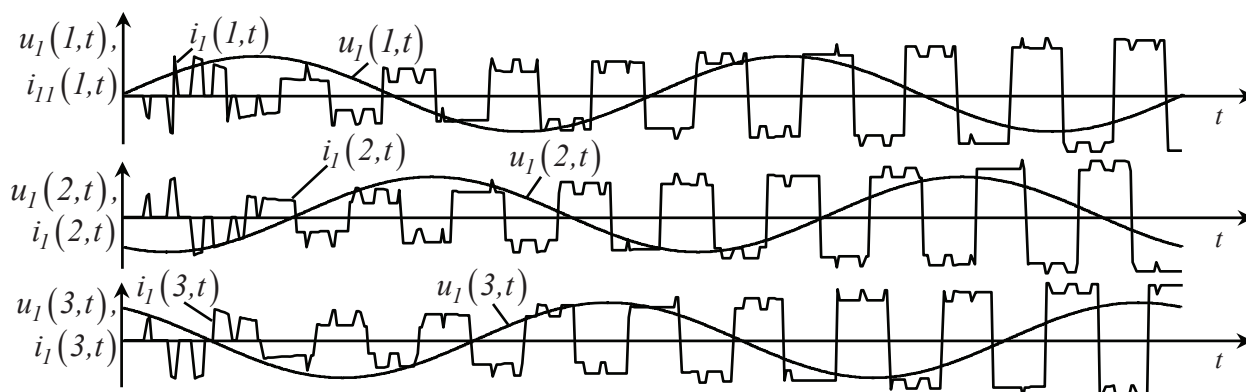


Рис. 3. Діаграми вхідних струмів i -х фаз мережі в координатах фазних напруг

Для узагальнення результатів досліджень електромагнітних процесів у НПП з високочастотним широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги доцільно проводити подання багатопараметричної модулюючої функції ІВН синхронно з множиною розгортаючих напруг, а також з координатами періодів високочастотної та низькочастотної комутацій силових ключів і множини напруг управління.

Проведений системний аналіз електромагнітних процесів у електричних колах напівпровідникових перетворювачів дозволяє виконувати моделювання у декілька етапів з різними початковими припущеннями, розглядаючи напівпровідникові перетворювачі, як систему зі своєю структурною побудовою, що визначає внутрішні впливи, в середовищі надсистеми зі своїми системами, які ззовні впливають на напівпровідникові перетворювачі.

Висновки

1. У данні роботі було виконано аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Використовуючи метод багатопараметричних модулюючих функцій було знайдено струм і напругу навантаження, а також вхідні струми перетворювача. Узагальнюючі функції багатопараметричного виду ефективні і для інших перетворювачів модуляційного типу.

2. Визначено багатопараметричні функції, введення яких до алгоритмічних рівнянь аналізу усталених і перехідних процесів у розгалужених електричних колах відображає своїми дискретними параметрами побудову кіл за підсистемними складовими, що дозволило спростити процес моделювання за рахунок узагальнення отриманих рівнянь для множин цих складових та елементів при дії зовнішніх факторів.

3. Розроблено нові математичні моделі електромагнітних процесів у колах напівпровідникових перетворювачів з багатоканальним зонним регулюванням фазних напруг без урахування комутаційних енергетичних втрат для швидкої оцінки впливу параметрів навантаження на рівень і форму вихідної напруги. З використанням розроблених моделей визначено алгоритми управління комутаторами при підключенні напівпровідникових перетворювачів до фазних напруг мережі, що дозволило підвищити якість знакопостійних напруг при багатозонному регулюванні вихідної напруги.

Список використаної літератури:

1. Макаренко Н. П. Математическая модель процесса формирования выходных напряжений преобразователей частоты / Н. П. Макаренко, Г. Абарка // *Электроника и связь*. – 1999. – № 6, Т. 2. – С. 60–64.
2. 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.
3. Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 3, P. 949–959.

4. Макаренко М. П. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачах з багатозонним регулюванням вихідної напруги функціями багатопараметричного виду / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч. 1. – С. 19–22.
5. Макаренко М. П. Математична модель перетворювача трифазної напруги в постійну напругу / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Електроніка і зв'язь. – 2002. – № 14. – С. 73–75.

References:

1. Makarenko N. P., Abarka G. Matematicheskaya model processa formirovaniya vyhodnyh napryageniy preobrazovateley chastoty [Mathematical model process of the shaping the output voltages of the converters of the frequency]. *Electronic i svyaz. – Electronics and relationship*, 1999, vol. 6, part. 2, P. 60–64.
2. Makarenko M. P., Senko V. I., Yurchenko M. M. Systemniy analiz elektromagnitnyh procesiv u napivprovodnycovykh peretvoryuvachah electroenergii moduljaciynogo typu [System analysis of the electromagnetic processes in semiconductor converter of the electric powers inflexion type]. *Kyiv, National academy of the sciences of the Ukraine, Institute of electrodinamiks*, 2005, 241 p.
3. Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 3, P. 949–959.
4. Makarenko M.P., Mihaylenko V.V. Analiz elektromagnitnyh procesiv u peretvoruvachah z bagatozonnum regulyuvannjam vyhidnoji naprugy funcsiyamu bagatoparametrychnogo vydu [The Analysis of the electromagnetic processes in converter with much zoned regulations of the output voltage function multivariable type]. *Technicheskaia electrodinamika. Silova elektronika i energoefektivnist - Thematic vypusk*, 2002., part 1., pp. 19-22.
5. Makarenko M.P., Mihaylenko V.V. Matematychna model peretvoruvacha trufaznoyi naprugy v postiynu naprugy [Mathematical model of the converter of the three-phase voltage in direct voltage]. *Electronics i svyaz*, 2002, vol 14, P. 73–75.

Поступила в редакцию 23.11 2015 г.