

## АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ З СІМНАДЦЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

В.І. Сенько<sup>1</sup>, В.В. Михайленко<sup>1</sup>, М.М. Юрченко<sup>2</sup>, О.М. Юрченко<sup>2\*</sup>, Ю.М. Чуняк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: [VladislavMihailenko@i.ua](mailto:VladislavMihailenko@i.ua)

<sup>2</sup> – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

У роботі проведено дослідження електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель напівпровідникового перетворювача з активно-індуктивним навантаженням і багатоканальним зонним регулюванням фазних напруг без урахування енергетичних втрат у напівпровідникових комутаторах. Розвинуто метод багатопараметричних функцій, які входять до алгоритмічних рівнянь аналізу усталених і перехідних процесів у розгалужених електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і реактивними елементами, щодо врахування особливостей використання фазних напруг мережі електроживлення. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах. Бібл. 3, рис. 2.

**Ключові слова:** вихідні напруга та струм, метод багатопараметричних модулюючих функцій.

**Вступ** Сучасний етап розвитку теоретичної електротехніки характеризується ускладненням задач аналізу електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах перетворювачів електроенергії, які використовуються в електроенергетиці і промисловості. Тенденції якісного перетворення електричної енергії, а також успіхи у розвитку напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою перемикання вентилів значно більшою 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 електромеханічних пристроїв. У даній роботі проводиться аналіз аспекту використання тієї самої структури ПЧ як ланки високої частоти через побудову та аналіз перетворювачів для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при сімнадцятизонному керуванні.

**Метою роботи** є аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами з використанням методу багатопараметричних функцій та пакету MATHCAD.

**Аналіз електромагнітних процесів.** Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1, де позначено: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних напруг А, В і С відповідно, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження. Сукупність СМ, підімкнених до електричної мережі паралельно і з'єднаних по виходу послідовно, представляє собою ланку високої частоти перетворювача. Кожен СМ має у своєму складі випрямляч і високочастотний інвертор. Створення математичної моделі перетворювача передбачає розробку математичного забезпечення, спроможного провести аналіз його електромагнітних процесів у напівпровідниковому перетворювачі. При складанні математичної моделі перетворювача використаємо метод багатопараметричних

модулюючих функцій [1]. При цьому припускаємо, що вхідна мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди інверторів випрямленої напруги (ІВН) представляються ідеальними ключами, трансформатори не мають втрат, а навантаження має еквівалентний активно-індуктивний характер.

Розгалужена структура електричних кіл з напівпровідниковими комутаторами, представлена на рис. 1, дозволяє реалізувати зонний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії трифазної мережі електроживлення, коли у силових модуляторах буде здійснюватися модуляція миттєвих значень попередньо випрямлених фазних синусоїдальних напруг  $u_1(i,t)$  частотою  $\omega_1$  відповідними еквівалентними модулюючими впливами  $\psi(\alpha_p,t)$  з частотою  $\omega_2$ . Ця структура реалізує багатоканальний спосіб перетворення параметрів електричної мережі. В результаті цього на вході ВВ формується промодульована напруга

$$u_2(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{p=1}^{17} \sum_{i=1}^3 u_1(i,t) \phi(i,t) \psi(\alpha_p,t), \quad (1)$$

де  $i = 1, 2, 3$  – номери фаз;  $k_T$  – коефіцієнт трансформації трансформатора;  $p = 1, 2, 3, \dots, n$  – номери зон;

$\phi(i,t) = \text{sign} \left\{ \sin(\omega_1 t - (i-1)2\pi/3) \right\}$  – функції, що співпадають за часом з положенням фазних напруг;

$u_1(i, t) = U_{1m} \sin(\omega_1 t - (i-1)2\pi/3)$  – миттєві значення вхідної напруги;  $U_{1m}$  – амплітудне значення напруги;  
 $\psi(\alpha_p, t) = \frac{1}{2} \sum_2 \text{sign}[\sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \varphi)]$  – модулюючі впливи;  $\alpha_p(t)$  – кути керування;  $\varphi$  – початкова фаза.

Вихідна напруга перетворювача  $u_d(t)$ , яка є випрямленою напругою (1), подається виразом

$$u_d(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{p=1}^{17} \sum_{i=1}^3 u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t) v(t), \quad (2)$$

де  $v(t) = \text{sign}(u_2(t))$  – функція прямокутного синуса, співпадаюча за часом з напругою  $u_2(t)$ .

Форма вихідної напруги обумовлена потребами споживачів для виконання їхніх функцій. 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 модулів напруг трифазної мережі електроживлення.

Струм навантаження знайдемо як реакцію одноконтурного  $RL$ -ланцюга на дію напруги (2). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо у вигляді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (3)$$

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

Рішення (3) відносно струму навантаження визначимо числовим методом у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (4)$$

де  $y$  – вектор початкових умов;  $0, k$  – часовий інтервал рішень;  $s$  – кількість точок;  $D$  – вектор-функція.

Еквівалентні модулюючі функції, які є безрозмірними і мають одиничну амплітуду, можна розглядати як функції перетворення, що визначають залежність вхідних струмів  $i_1(n, i, t)$  від вихідного струму  $i_d(t)$ , показаного у вигляді рішення (3) співвідношенням (4). При цьому в загальному вигляді

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_d(t) v(t) \psi(\alpha_p, t) \phi(i, t)}{k_T}. \quad (5)$$

Для визначення струмів  $i$ -х фаз електричної мережі у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги виконаємо підсумовування вхідних струмів інверторів усіх зон регулювання в кожній  $i$ -й фазі

$$i_1(i, t) = i_1(1, i, t) + \dots + i_1(17, i, t), \quad (6)$$

де  $i_1(1, i, t), \dots, i_1(17, i, t)$  – вхідні струми інверторів  $i$ -х фаз для сімнадцяти зон регулювання.

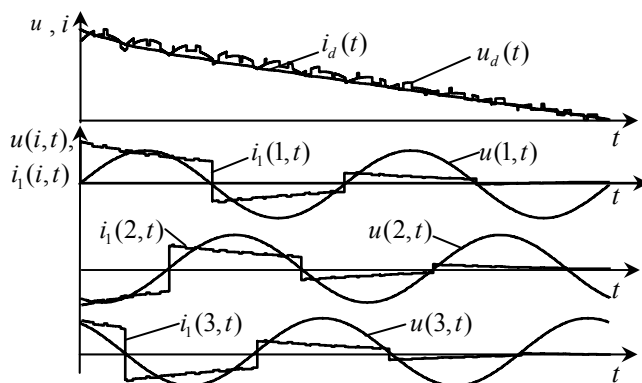


Рис. 2

На рис. 2 представлено часові діаграми вихідних струму і напруги, а також вхідних струмів і фазних напруг електричної мережі. Форма залежностей  $i_d(t)$  і  $u_d(t)$  обумовлена параметрами електромеханічного навантаження.

Для того, щоб знайти амплітудні значення струмів через силові транзистори ІВН, достатньо проаналізувати струми  $i_{1T}(n, i, t)$  первинних обмоток трансформаторів, які знаходяться в колах протікання струмів через силові транзистори. За часом ці струми співпадають з вихідним струмом ланки високої частоти перетворювача.

#### Висновки.

1. Розвинуто метод багатопараметричних модулюючих функцій у частині розробки нової математичної моделі і алгоритмічних рівнянь відносно функцій з 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 з синусоїдними та постійними напругами. Це спрощує системний аналіз усталених і перехідних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідникових перетворювачів з високочастотним широтно-імпульсним регулюванням їхніх вихідних напруг.

2. Розроблено математичну модель усталених і перехідних процесів в 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 ко-

мутаторами при підключенні напівпровідникових перетворювачів до фазних напруг мережі живлення та підвищення якості знакопостійних напруг при багатозонному регулюванні вихідної напруги.

1. Макаренко Н.П., Абарка Г. Математическая модель процесса формирования выходных напряжений преобразователей частоты // Электроника и связь. – 1999. – №6. – Т. 2. – С. 60–64.

2. Kiselychnyk O., Bodson M., Wang J. Model of a self-excited induction generator for the design of capacitor-controlled voltage regulators // Proc. of 21-st IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation. – Greece. Grete. – 2013. – Pp. 149–154.

3. Sinha G., Lipo T.A. A four level inverter based drive with a passive front end // Proc. IEEE–PESC'99 Conf. – 1999. – Pp. 590–595.

УДК 621.314

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ С СЕМНАДЦАТИЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В.И. Сенько<sup>1</sup>, В.В. Михайленко<sup>1</sup>, Н.Н. Юрченко<sup>2</sup>, О.Н. Юрченко<sup>2</sup>, Ю.М. Чуняк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

e-mail: [VladislavMihailenko@i.ua](mailto:VladislavMihailenko@i.ua)

<sup>2</sup> – Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

*В работе проведено исследование электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создана математическая модель полупроводникового преобразователя с активно-индуктивной нагрузкой и с многоканальным зонным регулированием фазных напряжений без учёта энергетических потерь в полупроводниковых коммутаторах. Развита метод многопараметрических функций, которые входят в алгоритмические уравнения анализа установившихся и переходных процессов в разветвлённых электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами и реактивными элементами с учётом особенностей использования фазных напряжений сети электропитания. Приведены графики, отображающие электромагнитные процессы в электрических цепях. Библ. 3, рис. 2.*

**Ключевые слова:** выходные напряжение и ток, метод многопараметрических модулирующих функций.

## ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN CIRCUIT WITH SEMICONDUCTOR CONVERTER WITH SEVENTEEN ZONED REGULATIONS OF THE OUTPUT VOLTAGE

V.I. Senko<sup>1</sup>, V.V. Mikhaylenko<sup>1</sup>, M.M. Yurchenko<sup>2</sup>, O.M. Yurchenko<sup>2</sup>, Yu.M. Chunya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,  
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: [VladislavMihailenko@i.ua](mailto:VladislavMihailenko@i.ua)

<sup>2</sup> – Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

*Study of the electromagnetic processes was organized beside robot in electric circuit with semiconductor commutator. It created a mathematical model of the semiconductor converter with an active-inductive load and with multi-channel zone regulation phase voltages disregarding losses in the semiconductor commutator. It is developed a method of multivariable function, which is a part of algorithmic equations for steady-state and transient processes analysis in networks with semiconductor commutators and reactive elements for using of phase voltage. The broughted graphs that display the electromagnetic processes in electric circuit. References 3, figures 2.*

**Keywords:** output straining and current, method multivariable modulating function.

1. Makarenko N.P., Abarka G. Mathematical model process of the shaping the output voltages of the converters of the frequency // Elektronika i sviaz. – 1999. – No 6. – Part. 2 – Pp. 60–64. (Rus)

2. Kiselychnyk O., Bodson M., Wang J. Model of a self-excited induction generator for the design of capacitor-controlled voltage regulators // Proc. of 21-st IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation. – Greece. Grete. – 2013. – Pp. 149–154.

3. Sinha G., Lipo T.A. A four level inverter based drive with a passive front end // Proc. IEEE–PESC'99 Conf. – 1999. – Pp. 590–595.

Надійшла 03.02.2016  
Остаточний варіант 07.04.2016