

## РОЗДІЛ V. ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.011.74.005

*Владислав Михайленко, Анатолій Сапегін, Катерина Левочка, Ганна Карпчук,  
Роман Дрьомов, Анастасія Бабенко*

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ДЕВ'ЯТНАДЦЯТИЗОН- НИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

*Владислав Михайленко, Анатолій Сапегін, Катерина Левочка, Анна Карпчук,  
Роман Дрьомов, Анастасія Бабенко*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ДЕВЯТНАДЦАТИЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*Vladyslav Myhailenko, Anatolii Sapehin, Kateryna Levochka, Hanna Karpchuk,  
Roman Dromov, Anastasiia Babenko*

### STUDY OF THE ELECTRIC MAGNETIC PROCESSES IN SEMICONDUCTOR CONVERTER WITH NINETEEN ZONED REGULATION OF THE OUTPUT VOLTAGE

Зроблено аналіз електромагнітних процесів в 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 дев'ятнадцятизонним регулюванням вихідної напруги з активно-індуктивним навантаженням. Досліджено електромагнітні процеси у напівпровідниковому перетворювачі модуляційного типу. Ключеві елементи були прийняті ідеальними.

**Ключові слова:** електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм.

Рис.: 3. Бібл.: 3.

Сделан анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создано математическую модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Приведено графики, которые отражают электромагнитные процессы в электрических цепях. Проведено системный анализ электромагнитных процессов в модуляционном полупроводниковом преобразователе с девятнадцатизонным регулированием выходного напряжения с активно-индуктивной нагрузкой. Исследовано электромагнитные процессы в полупроводниковом преобразователе модуляционного типа. Ключевые элементы были приняты идеальными.

**Ключевые слова:** электромагнитные процессы, выходные напряжение и ток.

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 broughted 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 nineteen 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.

Fig.: 3. Bibl.: 3.

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 [1–3] показана доцільність використання структур перетворювачів частоти (ПЧ) з однократною модуляцією під час побудови 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 дев'ятнадцятизонному керуванні.

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

Структурна схема напівпровідникового перетворювача (НПП) показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМАВ, СМВС, СМСА – силові модулятори (СМ) лінійних напруг АВ, ВС і СА 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.

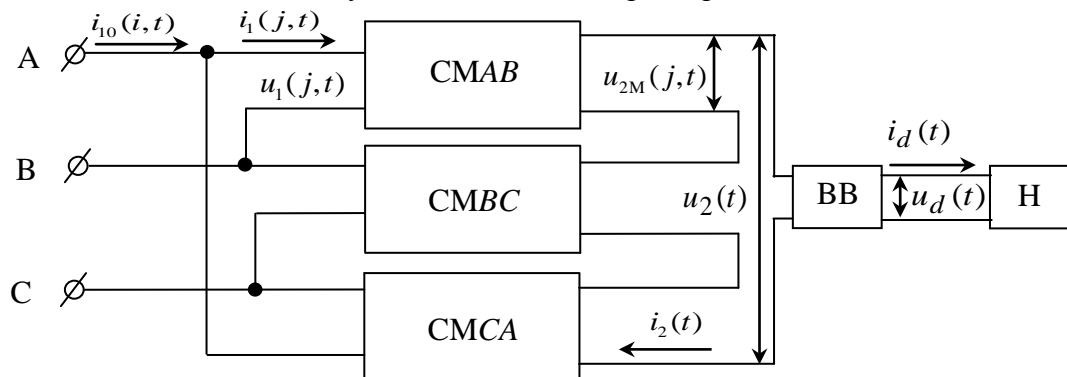


Рис. 1. Структурна схема перетворювача

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

Створення математичної моделі перетворювача передбачає розроблення математичного забезпечення, спроможного провести аналіз його електромагнітних процесів відносно енергії, яка генерується, з урахуванням характеру навантаження, енергії, яка при цьому споживається, а також енергії, яка перетворюється в окремих ланках і окремими елементами перетворювача.

Під час складання математичної моделі перетворювача із комп'ютерною орієнтацією її застосування використаємо метод багатопараметричних модулюючих функцій, який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому прийемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична та її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори й діоди ІВН є ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно-індуктивний характер.

Ця структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосібперетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, за якого в СМ здійснюється розгалужена модуляція миттєвих значень попередньо випрямлених лінійних напруг  $u_1(j,t)$ , частоти  $\omega_1$ , трифазної енергетичної мережі відповідними еквівалентними модулюючими впливами  $\psi(p, N, t)$ , частоти  $\omega_2$ . У результаті такої операції на виході кожного з ІВН формується промодульована напруга

$$u_{2M}(p, j, t) = \frac{1}{k_T} u_1(j, t) \phi(j, t) \psi(p, N, t), \quad (1)$$

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

синуса, які збігаються за часом з положенням лінійних напруг мережі;  $u_1(j, t)$  – миттєві значення вхідної напруги мережі.

Функції прямокутного синуса подаються, як

$$\phi(j, t) = \text{sign} \left\{ \sin \left( \omega_1 t - \frac{(j-1)2\pi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) \right\}, \tag{2}$$

а миттєві значення вхідної напруги мережі представлені у вигляді

$$u_1(j, t) = \sqrt{3}U_{1m} \sin \left( \omega_1 t - \frac{(j-1)2\pi}{3} + \frac{\pi}{6} \right), \tag{3}$$

$U_{1m}$  – амплітудне значення фазної напруги, а вихідна напруга  $u_d(t)$  подається виразом

$$u_d(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{p=1}^{19} \sum_{j=1}^3 u_1(j, t) \phi(j, t) \psi(p, N, t) v(t), \tag{4}$$

де  $v(t)$  – функція прямокутного синуса, що збігається за часом з положенням вихідної напруги  $u_2(t)$  ланки високої частоти перетворювача.

$$v(t) = \text{sign}(u_2(t)). \tag{5}$$

Струм навантаження знайдемо, як реакцію одноконтурного  $RL$ -ланцюга на дію напруги (5). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо у вигляді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \tag{6}$$

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

Рішення (6) відносно струму навантаження визначимо числовим методом у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \tag{7}$$

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

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

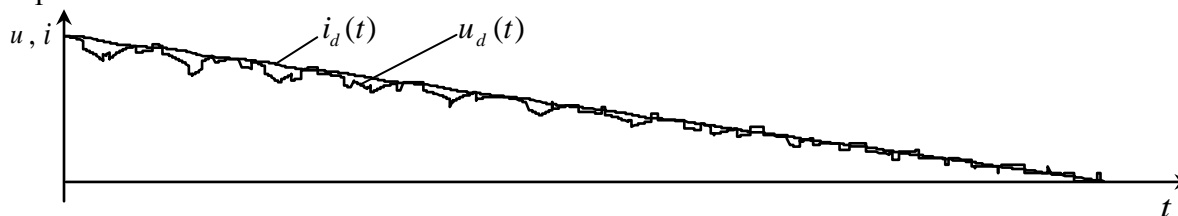


Рис. 2. Часові діаграми струму і напруги навантаження та вхідних струмів інверторів у координатах лінійних напруг енергетичної мережі

Вхідний струм високочастотного випрямляча має вигляд

$$i_2(t) = i_d(t)v(t). \tag{8}$$

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.

При цьому в загальному вигляді

$$i_1(p, j, t) = \frac{i_2(t)\psi(p, N, t)\phi(j, t)}{k_T}. \quad (9)$$

Для визначення вхідних СМ у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги підсумуємо вхідні струми відповідних ІВН. Враховуючи (9), загальний вираз для вхідних струмів СМ подамо у вигляді

$$i_1(j, t) = i_1(1, j, t) + i_1(2, j, t) + i_1(3, j, t) + \dots + i_1(19, j, t), \quad (10)$$

де  $i_1(1, j, t)$ ,  $i_1(2, j, t)$ ,  $i_1(3, j, t)$ ,  $i_1(19, j, t)$  – вхідні струми інверторів  $i$ -х фаз для першої, другої, третьої та дев'ятнадцятої зон регулювання

Струми  $i$ -х фаз енергетичної мережі зі співвідношень

$$\begin{aligned} i_{10}(1, t) &= i_1(1, t) - i_1(3, t) \\ i_{10}(2, t) &= i_1(2, t) - i_1(1, t) \\ i_{10}(3, t) &= i_1(3, t) - i_1(2, t). \end{aligned} \quad (11)$$

Часові діаграми вхідних струмів  $i$ -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (11) для дев'ятнадцятизонного регулювання, представлені на рис. 3.

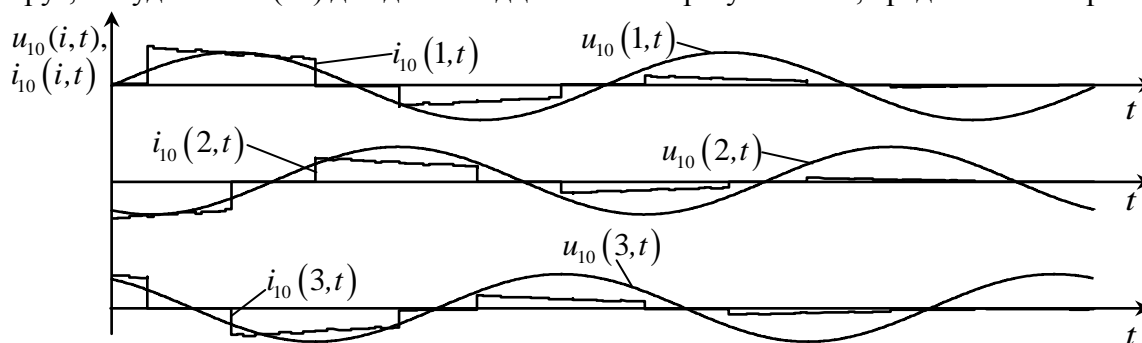


Рис. 3. Часові діаграми вхідних струмів  $i$ -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг

Системний підхід до аналізу дозволяє на другому його етапі, що характеризує вплив під час руху системи зовнішніх і внутрішніх факторів, 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 MATHCAD 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.

#### Список використаних джерел

1. 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.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

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» ; заявл. 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» ; заявл. 18.09.2006 ; опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.

## References

4. 1. Makarenko, M. P., Mykhailenko, V. V. (2002). Matematychna model peretvoriuvacha tryfaznoi napruhu v postinu napruhu [A mathematical model of the three-phase inverter voltage to a constant voltage]. *Elektronika i sviaz – Electronics and Communications*, no.14, pp.73–75.

2. Makarenko, M. P., Mykhailenko, V. V., Pilinskyi, V. V. (2006). *Invertor napruhy [Voltage inverter]*. Patent Ukrain No. 18750.

3. Makarenko, M. P., Mykhailenko, V. V. (2006). *Modulator vypriamlanoi napruhy [Modulator of rectified voltage]*. Patent Ukrain No. 20985.

**Михайленко Владислав Володимирович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Михайленко Владислав Володимирович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

**Mykhailenko Vladyslav** – PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the pulpit theoretical electrical engineers, National Technical University of the Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** VladislavMihailenko@i.ua

**Сапегін Анатолій Порфiрiйович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Сапегин Анатолий Порфирьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

**Sapehin Anatolii** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the pulpit theoretical electrical engineers, National Technical University of the Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** 8app575.sapp@yandex.ru

**Левочка Катерина Максимівна** – студентка кафедри відновлювальних джерел енергії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Левочка Катерина Максимовна** – студентка кафедры возобновляемых источников энергии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

**Levochka Kateryna** – student of the pulpit renewed sources to energy, National Technical University of the Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** lev@ukr.net.

**Карпчук Ганна Леонiдiвна** – студентка кафедри відновлювальних джерел енергії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Карпчук Анна Леонидовна** – студентка кафедры возобновляемых источников энергии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

**Karpchuk Hanna** – student of the pulpit renewed sources to energy, National Technical University of the Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** milkaleo@bigmir.net

**Дрjомов Роман Вадимович** – студент кафедри відновлювальних джерел енергії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Дрjомов Роман Вадимович** – студент кафедры возобновляемых источников энергии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

**Dromov Roman** – student of the pulpit renewed sources to energy, National Technical University of the Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** rdrdv2011@gmail.com

**Бабенко Анастасiя Андрiївна** – студентка кафедри відновлювальних джерел енергії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Бабенко Анастасия Андреевна** – студентка кафедры возобновляемых источников энергии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» (проспект Побды, 37, г. Киев, 03056, Украина).

**Babenko Anastasiia** – student of the pulpit renewed sources to energy, National Technical University of the Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** nastyahaus1@meta.ua