

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ВОСЬМИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**В. І. Сенько, В. В. Михайленко, К. В. Трубицин**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056. E-mail: VladislavMihailenko@i.ua**М. М. Юрченко, О. М. Юрченко**Інститут електродинаміки НАН України
просп. Перемоги, 56, м. Київ, Україна.

Проведено дослідження електромагнітних процесів в електричних колах із напівпровідниковими комутаторами. Для досягнення поставленої мети було створено математичну модель напівпровідникового перетворювача з електромеханічним навантаженням. Розроблено нові математичні моделі електромагнітних процесів у трифазних електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатоканальним зонним регулюванням фазних напруг без урахування енергетичних втрат у напівпровідникових комутаторах. Розвинуто метод багатопараметричних функцій, які входять до алгоритмічних рівнянь аналізу ustalених і перехідних процесів у розгалужених електричних колах із напівпровідниковими комутаторами й реактивними елементами в напрямі врахування особливостей використання фазних напруг мережі електроживлення. Для отримання необхідної форми вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів доцільно використовувати інвертори напруги. При цьому для моделювання та аналізу процесів регулювання напруги в силовому тракті попереднього формування постійної напруги ефективним є застосування математичної моделі процесу формування вихідної напруги, розробленої на основі методу багатопараметричних модулюючих функцій. Розроблено методики підвищення швидкості регулювання та визначення енергоефективних режимних параметрів напівпровідникових комутаторів електромеханічних систем. Визначено багатопараметричні функції, використання яких при дослідженні ustalених і перехідних процесів у розгалужених електричних колах відображає своїми дискретними параметрами побудову кіл за підсистемними складовими.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм, двигун постійного струму, метод багатопараметричних модулюючих функцій.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С ВОСЬМИЗОННОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ**В. И. Сенько, В. В. Михайленко, К. В. Трубицин**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056. E-mail: VladislavMihailenko@i.ua**Н. Н. Юрченко, О. Н. Юрченко**Институт электродинамики НАН Украины
просп. Победы, 56, г. Киев, Украина.

Проведено исследование электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Для достижения поставленной цели была создана математическая модель полупроводникового преобразователя с электромеханической нагрузкой. Разработаны новые математические модели электромагнитных процессов в трехфазных электрических цепях полупроводниковых преобразователей с многоканальным зонным регулированием фазных напряжений без учета энергетических потерь в полупроводниковых коммутаторах. Получил развитие метод многопараметрических функций, входящих в алгоритмические уравнения анализа установившихся и переходных процессов в разветвленных электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами и реактивными элементами в направлении учета особенностей использования фазных напряжений сети электропитания. Для получения необходимой формы выходного напряжения полупроводниковых преобразователей целесообразно использовать инверторы напряжения. При этом для моделирования и анализа процессов регулирования напряжения в силовом тракте предварительного формирования постоянного напряжения эффективно применение математической модели процесса формирования выходного напряжения, разработанной на основе метода многопараметрических модулирующих функций. Разработаны методики повышения скорости регулирования и определения энергоэффективных режимных параметров полупроводниковых коммутаторов электромеханических систем. Определены многопараметрические функции, использование которых при исследованиях устоявшихся и переходных процессов в разветвленных электрических цепях отражает своими дискретными параметрами построение кругов по подсистемным составляющим.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, выходные напряжение и ток, двигатель постоянного тока, метод многопараметрических модулирующих функций.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Якісне перетворення електричної енергії, а також успіхи в розвитку напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою перемикання вентилів значно більшою від частоти змінної напруги промислової мережі [1–10].

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 промисловою 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 їх 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.

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

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Навіть при допущенні про відсутність статичних і динамічних втрат електроенергії в напівпровідникових комутаторах вони залишаються нелінійними елементами. Але в такому випадку аналіз усталених і перехідних процесів між комутаціями можна досліджувати як процеси у лінійних колах. Методи аналізу перехідних процесів ускладнюються при збільшенні кількості реактивних елементів у незалежних контурах. Використання класичних методів розрахунку перехідних процесів дуже ускладнюється, якщо кількість реактивних елементів стає більше двох, а при необхідності врахування комутаційних втрат електроенергії у колах із напівпровідниковими комутаторами такий розрахунок стає неможливим.

Професор М.П. Макаренко розробив метод багатопараметричних функцій (МБФ), який спрощує оцінку усталених і перехідних процесів у колах із напівпровідниковими комутаторами. З використанням цього методу було проведено аналіз електромагнітних процесів у колах таких перетворювачів. Але ним не були розкриті особливості підключення напівпровідникових перетворювачів до фазної та лінійної напруги мережі електроживлення.

Метод багатопараметричних модулюючих функцій (БМФ) своєю назвою відображає як специфіку його використання для цілого класу НПП з багаторозгалуженими структурами, так і фізичну суть перетворення енергії – саме за рахунок організації різного виду модуляційних процесів.

При застосуванні для дослідження таких НПП методу БМФ моменти комутації струму транзисторів визначаються за часом існування комутуючих функцій, які знаходяться додатково за видом струмів вхідних контурів перетворювачів або струмів, що споживаються перетворювачами, коли вони співпадають між собою.

Метод БМФ [2] враховує реальне системне подання алгоритмів функціонування більшості пристроїв перетворювальної техніки, коли процеси формування вихідних напруг можна подати алгоритмічними рівняннями, що відображають процеси одно- чи багатократною модуляції напруг системи електроживлення різного роду еквівалентними модулюючими впливами. БМФ своєю назвою відображає як специфіку його використання для цілого класу НПП з багаторозгалуженими структурами, так і фізичну суть перетворення енергії – саме за рахунок організації різного виду модуляційних процесів. Еквівалентні модулюючі впливи, як зовнішні впливи з боку систем управління, подаються БМФ, аргументами яких є системні параметри систем управління та час. БМФ подаються знаковими функціями одичної амплітуди, які відображають у найпростішому випадку імпульси прямокутної форми, що реалізують у результаті різні види модуляції напруги мережі живлення. Процеси модуляції подаються операціями множення зовнішніх впливів з боку мережі живлення на відповідні зовнішні впливи з боку систем управління. Процеси регулювання вихідних напруг та перехідні режими роботи НПП моделюються за рахунок відповідного подання БМФ та напруг мережі живлення.

Для вирішення задач такого класу виникла потреба вдосконалити (розвинути) метод багатопараметричних функцій, які входять до алгоритмічних рівнянь усталених і перехідних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідниковими комутаторами. Для цього треба було розробити нові математичні моделі для швидкої оцінки впливу параметрів навантаження на характер перехідних процесів у колах перетворювачів, які можуть мати ємнісні накопичувачі енергії. Важливо було визначити вплив початкової енергії та кількості реактивних елементів в електричних колах на характер перехідних процесів та на вихідні параметри перетворювачів.

Використання різних методів розрахунку усталених і перехідних процесів в електричних колах із напівпровідниковими комутаторами визначаються доцільністю їх використання для досягнення високих енергетичних, динамічних, технічних і експлуатаційних характеристик напівпровідникових перетворювачів (НПП). Такі перетворювачі модуляційного типу здатні без зміни централізованої структури силової частини, що формує високочастотну змінну напругу,

формувані на навантаженні високочастотну широтно-імпульсну напругу.

Структурну схему перетворювача наведено на рис. 1. На структурній схемі позначено: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних напруг А, В і С відповідно, ВВ – високочастотний випрямляч, який підключений на вихід СМ, навантаження: D – двигун постійного струму номінальною потужністю $P=17,5$ кВт, який підключений до номінальної випрямленої напруги $U=1600$ В, номінальна частота обертання $n=1500$ об/хв., номінальний струм $I=12,3$ А, коефіцієнт корисної дії двигуна становить $\eta=0,825$. Сукупність СМ, підімкнених до енергетичної мережі паралельно й з’єднаних на виході послідовно, є ланкою високої частоти перетворювача.

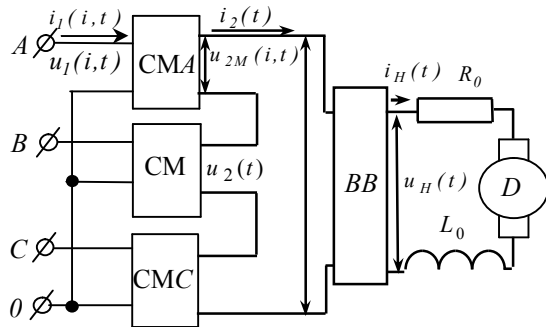


Рисунок 1 – Структурна схема НПП

Характерною особливістю НПП з багатозонним регулюванням вихідної напруги є багаторозгалуженість внутрішніх структур їх силових частин (рис. 2). Так, силова частина НПП, навіть за умови однозонного регулювання вихідної напруги, має три мостових інвертори випрямлених напруг (ІВН) мережі живлення, кожний з яких містить по дві стійки на ключах постійного струму, що в сукупності складає дещо ціле й має межі як система, яку можна виділити із середовища надсистеми. Середовище містить: первинну систему електроживлення, власне НПП як систему перетворення енергії, СУ та ДПС як систему, що має свої особливості. На першому етапі досліджень робимо припущення про ідеальність ключових елементів НПП, про необмежену потужність і симетрію ПСЕЖ та про значно більшу вихідну потужність НПП відносно навантаження; транзистори й діоди ІВН подаються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній із зон регулювання вихідної напруги не мають втрат.

На структурній схемі СМ (рис. 2) позначено: T – це узгоджувальні трансформатори, необхідні для гальванічної розв’язки мережі живлення й навантаження.

При реалізації ІППР вихідної напруги перетворювача силові ключі ІВН, які входять до складу СМ, за умови їх управління імпульсами напруги типу «мандр» беруть участь у двох процесах перетворення енергії, а саме: у споживанні енергії навантаженням (у провідному стані знаходяться відповідні пари транзисторів ІВН) та розсіянні енергії в контурі навантаження (у провідному стані знаходяться відповідні

пари, що складаються з транзисторів та діодів ІВН). Величини напруг, що прикладаються до первинних обмоток узгоджувальних трансформаторів ІВН, відрізняються від рівня напруги живлення, що припускалось за умови ідеалізації силових ключів, на величини падіння напруг на внутрішніх опорах ключових елементів перетворювача.

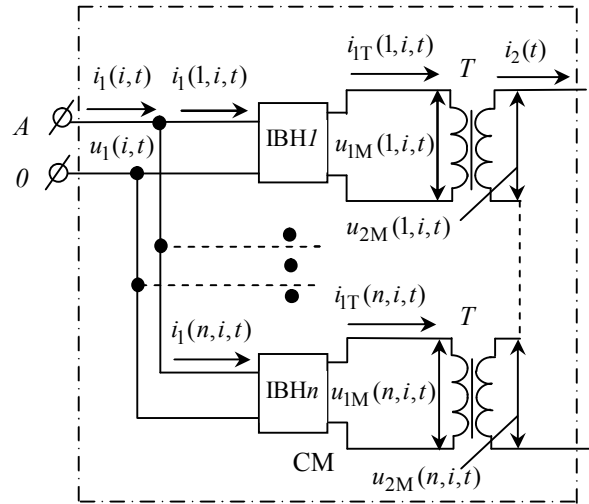


Рисунок 2 – Структурна схема СМ

Вихідну напругу НПП знаходимо з виразу виду

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^3 u_1(i,t) \psi_B(i,t) \psi(n,N,t) \psi_{BB}(t), \quad (1)$$

де $u_1(i,t) = E_m \sin\left(\omega_1 t - \varphi - \frac{(i-1)2\pi}{3}\right)$ – миттєві значення вхідних фазних напруг мережі живлення;

$\psi_B(i,t) = \text{sign}\left[\sin\left(\omega_1 t - \varphi - \frac{(i-1)2\pi}{3}\right)\right]$ – функції пря-

мокутного синуса, що співпадають за часом із положенням відповідних фазних напруг мережі; $\omega_1 = 2\pi f_1$ і φ – відповідно кругова частота й початкова фаза напруги живлення; E_m – амплітудне значення фазної напруги; $n = 1, 2, 3, \dots, N$ – номери зон регулювання вихідної напруги; $\psi(n,N,t)$ – множина еквівалентних модулюючих впливів i -х інверторів СМ;

$\psi_{BB}(t) = \text{sign}(u_2(t))$ – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом із положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти НПП, де $\text{sign}[u_2(t)]$ –

одичинна за амплітудою моделюючої функції, що збігається за фазою й частотою з початковою фазою та частотою високочастотної квазісинусоїдальної напруги; k_T – коефіцієнт трансформації вихідних трансформаторів СМ.

Для більш детального аналізу вихідної напруги перетворювача в (1) позначимо $u_1(i,t) \psi(n,N,i,t) = |u_1(i,t)|$ і з урахуванням, що $\psi_1(n,N,i,t) \psi_{BB}(t) = |\psi(n,N,i,t)|$, алгоритмічне рівняння перепишемо у вигляді

$$u_H(t) = \frac{1}{2k_T} \sum_{n=1}^N \left(\sum_{i=1}^3 \left[E_m \sin \left(\omega_1 t - \varphi - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \text{sign} \left[\sin \left(\omega_2 t \pm \alpha(t) - \alpha_0 + (n-1) \frac{\pi}{3N} + \frac{2(i-1)\pi}{3} \right) \right] \right] \right) \quad (2)$$

З виразу (2) видно, що вихідна напруга перетворювача досягне максимальної величини за умови, що $\alpha(t) = 0$. У цьому випадку частота пульсацій вихідної напруги $\omega_p = 6\omega_1$, а (2) прийме вигляд

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^3 \left[E_m \sin \left(\omega_1 t - \varphi - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right] \quad (3)$$

З виразу (3) легко знайти середнє значення вихідної напруги

$$U_{H0} = \frac{2,7}{k_T} (U_{11} + U_{12} + U_{13} + \dots + U_{1N}) = \\ = 2,7(U_{21} + U_{22} + U_{23} + \dots + U_{2N}), \quad (4)$$

де $U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{1N}$ і $U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{1N}$ – відповідно діючі значення напруг первинної і вторинної обмоток узгоджувального трансформатора для першої, другої, третьої та N -ї зони регулювання

$$U_{2n} = \frac{1}{k_T} U_{1n}.$$

З урахуванням виразу (4), у повному діапазоні зміни $\alpha(t)$ регулювальна характеристика перетворювача приймає вигляд

$$U_{H\alpha} = 2,7 \sum_{n=1}^N U_{2n} \gamma,$$

де $\gamma = \frac{t_i}{T_2}$ – коефіцієнт заповнення; t_i – ширина імпульсу вихідної напруги при ШПР; T_2 – період модулюючого впливу; $t_i = 0 - T_2$; $T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2}$.

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

$$\begin{pmatrix} i_{H_k}(t) + \frac{2(c(t) - \varepsilon_{ch})}{a_1} - \frac{2\varepsilon_a}{a_1} i_{H_k}(t) - \\ - \frac{2}{a_1} n_k(t) i_{H_k}(t) - \frac{2}{a_1 a_3} i_{H_k}^3(t); \\ n_k(t) + \frac{4(c(t) - \varepsilon_{ch}) i_{H_k}(t)}{a_1 a_3} - \\ - \frac{2\varepsilon_M}{a_3} n_k(t) + \frac{2}{a_3} i_{H_k}^2(t) - \\ - \frac{2}{a_1 a_3} i_{H_k}^2(t) n_k(t) - \frac{2\varepsilon_{M0}}{a_3} \end{pmatrix} = \quad (5)$$

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; $a_1 = \varepsilon_a + \frac{2T_{ab}}{\Delta t}$; $a_3 = \varepsilon_M + \frac{2T_M}{\Delta t}$; T_{ab} і T_M – електромагнітна та механічна постійні часу двигуна; Δt – крокові інтервали часу, за якими проводяться розрахунки процесів.

Система (5) 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 й лінеаризованої кривої намагнічування.

Діаграми струмів кола якоря ДПС НПП зображено на рис. 3. 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).

Вихідний струм $i_2(t)$ визначаємо із співвідношення

$$i_2(t) = i_{H_k}(t) \psi_{BB}(t). \quad (6)$$

З урахуванням (6) вхідні струми $i_1(n, i, t)$ знаходимо з виразу

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t) \psi_B(i, t) \psi(n, N, t)}{k_T}. \quad (7) \quad (2.13)$$

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, згідно з виразом (7). Загальний вираз для струмів i -х фаз мережі подамо у вигляді

$$i_1(i, t) = i_1(1, i, t) + i_1(2, i, t) + \dots + i_1(N, i, t), \quad (8)$$

де $i_1(1, i, t), i_1(2, i, t), i_1(N, i, t)$ – вхідні струми інверторів i -х фаз на інтервалах першої, другої, та N -ї зони регулювання.

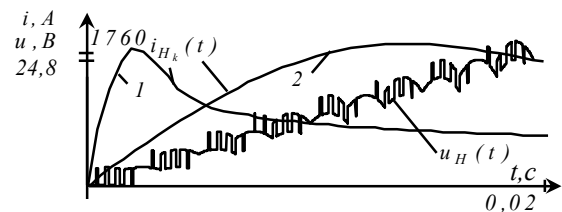


Рисунок 3 – Діаграми струмів і напруг кола якоря ДПС

Діаграми вхідних струмів та напруг, побудовані за (8), зображено на рис. 4.

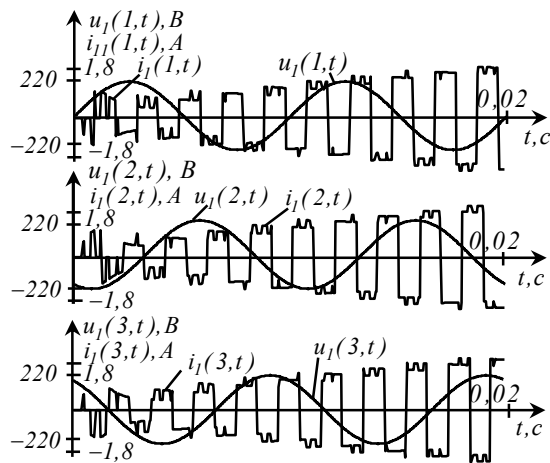


Рисунок 4 – Діаграми вхідних струмів i -х фаз мережі в координатах фазних напруг

Використання багатопараметричних модулюючих функцій у математичних моделях електромагнітних процесів у електричних колах із 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 фазних і лінійних напруг трифазної мережі електроживлення, що спрощує підвищення якості знакопостійних напруг у процесі формування та багатозонного регулювання вихідних синусоїдних і знакопостійних напруг.

Для структурної організації НПП із високочастотним широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги доцільно використовувати ІВН для формування проміжної високочастотної напруги. При цьому для моделювання та аналізу процесів регулювання напруги в силовому тракті попереднього формування постійної напруги ефективним є застосування математичної моделі процесу формування вихідної напруги, розробленої на основі методу багатопараметричних модулюючих функцій; без використання цього методу неможливо формалізовано знайти струми транзисторів ІВН.

Подальше узагальнення результатів досліджень можливо реалізувати за рахунок визначення багатопараметричних модулюючих функцій синхронно з множиною модуляцій напруг, фазами їх високо- та низькочастотних комутацій і множинами сигналів управління комутаторами. Це спрощує системний аналіз усталених і перехідних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідникових перетворювачів із високочастотним широтно-імпульсним регулюванням їх вихідних напруг.

Для структурної організації НПП з високочастотним широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги доцільно використовувати ІВН для формування проміжної високочастотної напруги. При цьому для моделювання та аналізу процесів регулювання напруги в силовому тракті попереднього фо-

рмування постійної напруги ефективним є застосування математичної моделі процесу формування вихідної напруги, розробленої на основі методу багатопараметричних модулюючих функцій, оскільки без використання цього методу неможливо формалізовано знайти струми через транзистори ІВН.

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.

Створено нові схемотехнічні рішення напівпровідникових комутаторів з високочастотним широтноімпульсним регулюванням їх вихідної напруги при зміні параметрів навантаження в широких межах, які дозволили підвищити швидкодію електротехнологічних систем.

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.

Системний підхід до аналізу дозволяє на другому його етапі, що характеризує вплив під час руху системи зовнішніх і внутрішніх факторів, провести уточнення попередніх досліджень, з урахуванням нових припущень, наприклад, відносно неідеальності внутрішніх опорів ключових елементів. Тому в наступних дослідженнях доцільно врахувати вплив втрат у ключових елементах НПП.

Однією з найбільш важливих науково-прикладних задач при розробці параметрів електроенергії для технологічних установок електроімпульсної обробки різних матеріалів є задача дослідження перехідних процесів у напівпровідникових перетворювачах (НПП) [1, 2]. У зв'язку з необхідністю дослідження їх електромагнітних процесів доцільним є використання спеціалізованих математичних моделей. У багатьох випадках аналіз таких режимів у колах НПП можна спростити, використовуючи метод багатопараметричних модулюючих функцій та спеціалізовані програмні пакети типу MATCAD та MATLAB.

ВИСНОВКИ. 1. У даній роботі було виконано аналіз електромагнітних процесів в електричних колах із силових модуляторів. Використовуючи метод багатопараметричних модулюючих функцій, було знайдено струм і напругу навантаження, а також вхідні струми перетворювача.

2. Розвинуто метод багатопараметричних функцій для системного аналізу усталених і перехідних процесів в електричних колах напівпровідникових перетворювачів з електромагнітних процесів у напі-

впровідникових перетворювачах із високочастотним широтно-імпульсним регулюванням напруги мережі електроживлення на основі використання алгоритмічних рівнянь багатопараметричних функцій, аргументами яких є системні параметри напівпровідникових комутаторів (діодів, тиристорів та транзисторів), напруг управління, кутів управління, фаз мережі живлення й час.

3. Визначено багатопараметричні функції, використання яких при дослідженнях 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.

ЛІТЕРАТУРА

1. Макаренко Н.П., Абарка Г. Математическая модель процесса формирования выходных напряжений преобразователей частоты // *Электроника и связь*. – 1999. – Вып. 6. – Т. 2. – С. 60–64.

2. Макаренко М.П., Сенько В.І., Юрченко М.М. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу. – К.: НАН України, ІЕД, 2005. – 241 с.

3. Hossein H., Hossein M., Luichen Ch. A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD // *IEEE Trans. On Industrial Electronics*. – 2011. – Iss. 58 (3). – PP. 949–959.

4. Афанасьев А.М. Определение рациональных режимов взаимного нагружения тяговых двигателей электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта // *Наука та прогрес на транспорті*. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 1 (43). – С. 67–74.

5. Забарилко Д.А. Особенности расчета силового трансформатора повышенной частоты // *Наука та прогрес на транспорті*. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 3 (45). – С. 29–35.

6. Каменев О.Ю. Проблематика підходів до дослідження безпеки використання енергетичних сис-

тем керування на залізничному транспорті // *Наука та прогрес на транспорті*. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 2 (44). – С. 7–16.

7. Hossein H., Hossein M. and Luichen Ch. Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter // *IEEE Trans. On Power Delivery*. – Iss. 28 (2). – PP. 575–584.

8. Zarri L., Mengoni M., Toni A., Ojo J.O. Range of the linear modulational in matrix converters // *IEEE Trans. On Power Electronics*. – 2014. – Iss. 29 (6). – PP. 3166–3178.

9. Щерба А.А. Супруновская Н.И., Белецкий О.А. Энергетические характеристики суперконденсаторов при их заряде от источника напряжения и разряде на резистивную нагрузку // *Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України*. – 2014. – Вип. 39. – С. 65–73.

10. Регулювання напруги асинхронних генераторів з самозбудженням за допомогою сімісторно-комутованої конденсаторної батареї / М.В. Пушкар, С.О. Бур'ян, В.В. Михайленко // *Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України*. – 2014. – Вип. 39. – С. 52–56.

11. Shakweh Y., Lewis E.A. Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drives applications // *Proc. IEEE-PESC'99 Conf.* – 1999. – PP. 590–595.

12. Wheeler P.W., Wheeler P.W., Clare J.C. et al. The Technology and Potential of Matrix Converters *Power Electronics Europe*. – 2001. – Iss. 5. – PP. 25–28.

13. 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.

14. Pena R., Clare J.C., Asher G.M. A doubly-fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine // *Proc. IEE*. – 1996. – Iss. 143 (5). – PP. 380–387.

15. Holmer L.L., Holmer D. Borojevic. Analysis, design and implementation of the space-vector modular for forced-commutated cycloconverters // *EE Proceedings*. – 1992. – Iss. 139 (2). – PP. 103–113.

STUDY OF ELEKTROMAGNETIC PROCESSES IN THE SEMICONDUCTOR CONVERTER WITH EIGHTZONE REGULATION OF THE OUTPUT VOLTAGE AND ELECTROMECHANICAL LOAD

V. Senko, V. Mihaylenko, K. Trubicyn

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
prosp. Peremohy, 37, Kyiv, Ukraine, 03056. E-mail: VladislavMihailenko@i.ua

N. Yurchenko, O. Yurchenko

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine
prosp. Peremohy, 56, Kyiv, Ukraine.

Study of the electromagnetic processes was organized beside robot in electric circuit with semiconductor commutator. For this purpose, it created a mathematical model of the semiconductor converter with an electromechanical load. New mathematical models of electromagnetic processes were designed in a three-phase electric circuit of semiconductor converters 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. For reception of the necessary form of the output voltage of the semiconductor converters reasonable to use inverters of the voltage. For modeling and analysis processes of voltage regulation in power circuit of the preliminary shaping the DC voltage it is efficient to use a mathematical model of the shaping the output voltage, is process based on the method of multiparametrical modulating functions. It is worked out methods of regulation speed rising and determination energy-effective regime parameters of semiconductor commutators of the electromechanical systems. It is determined multivariable functions, use which at study formed and connecting processes in furcated electric circuit displays their own discrete parameter a building circuit on under system components.

Key words: electromagnetic processes; the output voltage and current; the engine of the direct current; method of multivariable modulating function.

REFERENCES

1. Makarenko, N.P. and Abarka, G. (1999), "Matematicheskaya model processa formirovaniya vyhodnyh napryazheniy preobrazovateley chastoty", *Electronica i svyaz*, Vol. 6, no. 2, pp. 60–64. (in Russian)
2. Makarenko, M.P., Senko, V.I., Yurchenko, M.M. (2005), *Systemniy analiz elektromagnitnyh procesiv u napivprovodnycovykh peretvoryuvachah electroenergii moduljatsiynogo typu* [System analysis of the electromagnetic processes in semiconductor converter of the electric powers inflexion type], National academy of the sciences of the Ukraine, Institute of electrodinamiks, Kyiv. (in Ukrainian)
3. Hossein, H., Hossein, M. and Luichen, Ch. (2011), "A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD", *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 58, no. 3, pp. 949–959.
4. Afanasiev, A.M. (2013), "Determination rational mode mutual load tractive engines of the electro rolling stock main and industrial transport", *Nauka i progres na transporte. Vesnik Dnepropetrovskogo natsionalogo universitetu zaliznychnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, Vol. 1, no. 43, pp. 67–74. (in Russian)
5. Zabarylo, D.A. (2013), "Particularities of the calculation of the power transformer of the raised frequency", *Nauka i progres na transporte. Vesnik Dnepropetrovskogo natsionalogo universitetu zaliznychnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, Vol. 3, no. 45, pp. 29–35. (in Russian)
6. Kamenev, O.Y. (2013), "Problem approach to safety study of the use energy managerial system on rail-freight traffics", *Nauka i progres na transporte. Vesnik Dnepropetrovskogo natsionalogo universitetu zaliznychnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, Vol. 2, no. 44, pp. 7–16. (in Ukrainian)
7. Hossein, Hojabri, Hossein, Mokhtari and Luichen Chang. Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter, *IEEE Trans. On Pauer Dalivery*, Vol. 28, no. 2, pp. 575–584.
8. Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. (2014), Range of the linear modulational in matrix converters, *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol. 29, no. 6, pp. 3166–3178.
9. Scherba, A.A., Suprunovskaya, N.I. and Beleckiy, O.A. (2014), "Energy features super capacitor under their charge from source of the voltage and category on resistor load", *Pratsi instytutu elektrodynamiky Natscionalnoyi akademiyi nauk Ukrayiny*, Vol. 39, pp. 65–73. (in Russian)
10. Pushkar, M.V., Buryan, S.O. and Mihaylenko, V.V. (2014), "Regulation of the voltage anisochronous generator with independent excitement by means of simistor commutator to batteries", *Pratsi instytutu elektrodynamiky Nacionalnoyi akademiyi nauk Ukrayiny*, Vol. 39, pp. 52–56. (in Ukrainian)
11. Shakweh, Y. and Lewis, E.A. (1999), "Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drives applications", *Proc. IEEE-PESC'99 Conf.*, pp. 590–595.
12. Wheeler, P.W., Wheeler, P.W., Clare, J.C. et al. (2001), "The Technology and Potential of Matrix Converters", *Power Electronics Europe*, Vol. 5, pp. 25–28.
13. Sinha, G. and Lipo, T.A. (1999), "A four level inverter based drive with a passive front end", *Proc. IEEE-PESC'99 Conf.*, pp. 590–595.
14. Pena, R., Clare, J.C. and 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. IEEE – Part B*, Vol. 143, no. 5, pp. 380–387.
15. Holmer, L.L. and Holmer, D. Borojevic (1992), Analysis, design and implementation of the space-vector modular for forced-commutated cycloconverters, *EE Proceedings-B*, Vol. 139, no. 2, pp. 103–113.

Стаття надійшла 26.05.2015.