

## КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З БАГАТОРОЗГАЛУЖЕНИМИ СТРУКТУРАМИ

У статті проведено 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 у електричних колах.

Analysis of the electromagnetic processes is organized in article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis of the electromagnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. It is shown graphs that show the electromagnetic processes in electric circuit.

### Вступ

Одним з найбільш потужних інструментів для розрахунків, аналізу та оптимізації напівпровідникових перетворювачів (НПП) електроенергії і пристроїв силової та інформаційної електроніки є сучасні пакети програмного забезпечення персональних комп'ютерів (ПК). Практичне використання такого програмного забезпечення особливо актуальне і виправдане зараз, коли в умовах розширеної інформаційності потужність та пакети програм сучасних ПК стали такими, що їхнім користувачам тільки потрібно зосередити свої зусилля на вирішенні науково-технічних задач, притаманних лише певним профілям їхньої спеціалізації. Це стало можливим сьогодні завдяки існуванню цілої низки інтегрованих систем проектування, автоматизації розрахунків тощо. До них відносяться: MatLab, MathCAD, EWB 8, OrCAD 9.2, MC 6, CAD-системи, SPICE, XSPICE, MultiSim 2014 тощо, з допомогою яких розроблено цілу низку моделей елементної бази силової та інформаційної електроніки, окремих вузлів, блоків і систем НПП електроенергії та технологічних установок на їхній основі [1 – 14]. Неперервне удосконалювання математичного забезпечення програм такого класу дозволяє проектувальникам НПП адекватно і швидко отримувати і обробляти результати моделювання.

Проте використання традиційного підходу до моделювання всього лише вузлів НПП за схемою електричною принциповою, кожен силовий чи будь-який елемент якої подається комп'ютерною моделлю, що враховує найменшу сталу часу при його функціонуванні,

призводить до збільшення розмірності та жорсткості диференціальних рівнянь математичного забезпечення повної моделі, внаслідок чого зростає час моделювання, а то й зривається його стійкість. Особливо цей аспект проявляється у разі моделювання електромагнітних процесів у НПП електроенергії з багаторозгалуженими структурами силових частин та систем керування.

Одним з напрямків вирішення проблеми комп'ютерного аналізу НПП з багаторозгалуженими структурами став перехід від властивостей та фізичних процесів у окремих елементах на більш високі ієрархічні рівні, – функціональний та структурний при умові їхньої сумісності з моделями окремих елементів [1, 2, 4, 5]. Іншим, не менш перспективним напрямком вирішення згаданої проблеми є використання системних методів моделювання електромагнітних процесів у НПП [6 – 9] з застосуванням математичного процесора MathCAD.

**Метою даної роботи** є порівняльний аналіз деяких аспектів названих вище напрямків комп'ютерного аналізу НПП для визначення доцільності їхнього використання на різних етапах дослідження електромагнітних процесів.

### Аналіз електромагнітних процесів

Перший з напрямків до початку безпосереднього моделювання потребує досить трудомісткої попередньої роботи, яка, в залежності від складності конкретного схемотехнічного рішення НПП, інколи може зайняти більшу частину часу, відведеного на процес наукових досліджень. При наявності бібліотек функціональних блоків така робота передбачає, крім їхнього

тестування у необхідних ситуаційних режимах, подання схем НПП на функціональному та структурному рівнях, їхній опис з представленням множин необхідних завдань у вигляді сталих величин чи програм, а також установку та тестування, зокрема в пакеті MatLab, індикаційного обладнання. В подальшому проявляються власні достоїнства створених моделей у можливості оперативної зміни завдань за їхньою кількістю та числовими значеннями.

Другий напрямок базується на методі багатопараметричних модулюючих функцій (БМФ) [6, 7], який забезпечує можливість аналізу електромагнітних процесів шляхом їхнього моделювання за формалізовано складеними алгоритмічними рівняннями роботи НПП, як систем перетворення електроенергії. У такому разі алгоритмічні рівняння подаються функціями багатопараметричного виду, аргументами яких є структурні параметри систем, що віддзеркалюють їхній склад за множинами підсистем та елементів, котрі утворюються в результаті декомпозиції системи в межах цілого. По суті, складене таким чином рівняння описує за наперед заданим законом модуляції зовнішній вплив НПП на іншу систему, якою є навантаження разом зі згладжувальним фільтром. Повний цикл моделювання проводиться від визначення алгоритмічного рівняння, яке дає можливість оперативно отримати кінцевий результат, що подає поведінку вихідних координат системи, як цілого (причому як у сталих, так і в перехідних режимах роботи без зміни виду алгоритмічного рівняння), до аналізу процесів у найпростіших елементах підсистем.

Системний підхід дозволяє проведення досліджень з певним числом ітерацій, кожна наступна з яких має нові, більш жорсткі відносно попередньої, припущення. Це дає можливість оперативно оцінювати взаємозалежні електромагнітні процеси з урахуванням як внутрішніх міжпідсистемних, так і зовнішніх міжсистемних впливів з одночасним підвищенням достовірності результатів моделювання. Власним достоїнством системних досліджень у середовищі MathCAD є те, що вони потребують значно менших за трудомісткістю підготовчих робіт. Підготовка до моделювання передбачає окреслення меж систем, їхню декомпозицію за підсистемними і елементними складовими та визначення алгоритмічних рівнянь роботи НПП, як систем, з урахуванням зовнішніх та внутрішніх впливів на них. Процес моделюван-

ня проводиться поетапно з представленням множин необхідних завдань до відповідних алгоритмічних рівнянь у вигляді сталих чи змінних величин, що дозволяє, з урахуванням показань часових діаграм, які реалізуються наявним у середовищі MathCAD потужним графічним редактором, оперативне коригування та виключення помилок у процесі досліджень.

Для порівняння згаданих вище напрямків аналізу НПП з багаторозгалуженими структурами розглянемо приклад моделювання електромагнітних процесів у НПП трифазної напруги у постійну з можливістю двозонного регулювання вихідної напруги, побудованого за схемою, що містить ланку високої частоти. До складу НПП входять: випрямляч (В) за схемою Ларіонова, з'єднаний вхідними шинами з трифазним джерелом напруги, а виходом підключений до силових входів високочастотних інверторів випрямленої напруги (ІВН). Узгоджувальні трансформатори ІВН з'єднаними послідовно вторинними обмотками створюють контур для підключення діагоналі постійного струму високочастотного випрямляча (ВВ), вихід якого утворює вихід НПП. За базовий приймемо один з найбільш популярний сьогодні програмний пакет MatLab, зокрема одну з його версій (MATLAB 6.5, release13), яка постачається з пакетом візуального моделювання Simulink 5.0.

На рис.1 представлена модель згаданого НПП, в якій блок Universal Bridge подає випрямляч за схемою Ларіонова. Крім цього, при побудові моделі використано наступні функціональні блоки: трифазне джерело напруги, з можливістю завдання його внутрішніх параметрів за величинами еквівалентних опорів та індуктивностей впродовж фазних проводів; ІВН1, ІВН2 – інвертори випрямленої напруги першої та другої зон регулювання вихідної напруги; Т1, Т2 – узгоджувальні трансформатори ІВН1 та ІВН2 відповідно; ВВ – високочастотний випрямляч; СК – схема керування;  $i_d(t)$  (Current Measurement),  $u_d(t)$  (Voltage asurement) – вимірювальні прилади, що фіксують струм навантаження та напругу на ньому відповідно;  $u_1(1,t)$ ,  $u_1(2,t)$ ,  $u_1(3,t)$  та  $i_d(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$  – блоки вимірювання напруги та струмів вхідної трифазного джерела напруги; Scope1, Scope2 – блоки візуального спостереження електромагнітних процесів.

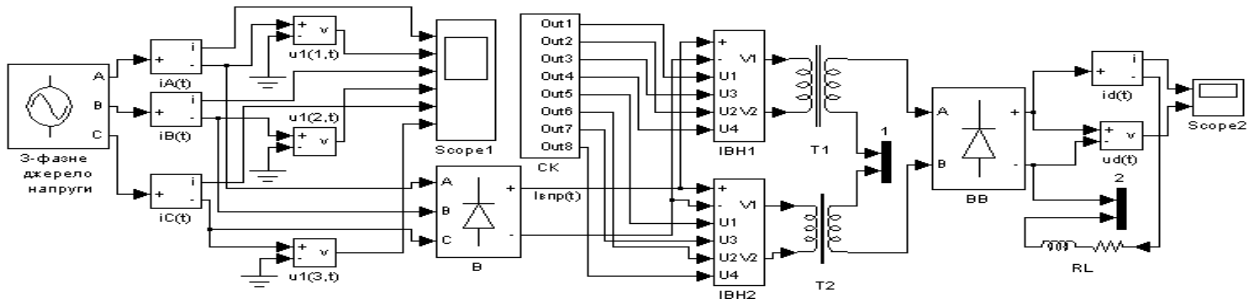


Рис.1. Структурна схема перетворювача

Кожен з IBH (рис.2) складається з 4-х транзисторів IGBT та 4-х зворотних діодів D, увімкнених у відповідних стійках, з'єднаних за мостовими схемами. Крім того до складу IBH входять енергообміні конденсатори С.

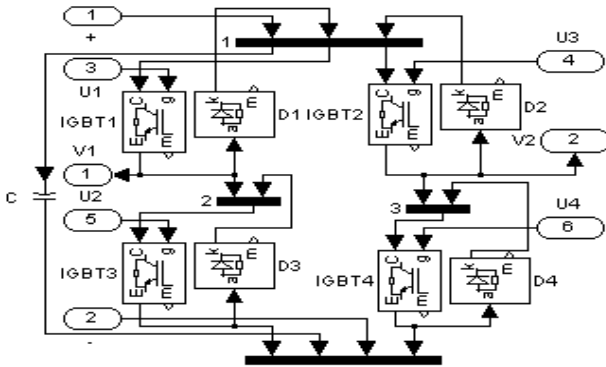


Рис. 2. Схема IBH

СК (рис.3) містить: ГПН1, ..., ГПН3 та Г1, Г2 – генератори пилоподібних напруг; та напруг з лінійними законами зміни відповідно; Sum1 та Sum2 – аналогові суматори, які дозволяють алгебраїчне підсумовування будь-якої кількості входних сигналів; sin та sign1, ..., sign4 – блоки формування тригонометричних та знакових функцій від завдань на входах; Product1, ..., Product4 – аналогові помножувачі входних напруг.

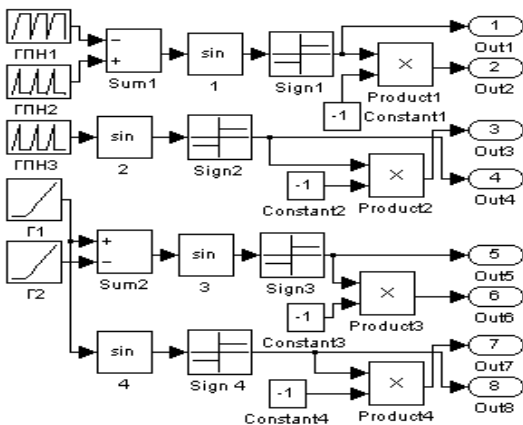


Рис. 3. Схема СК

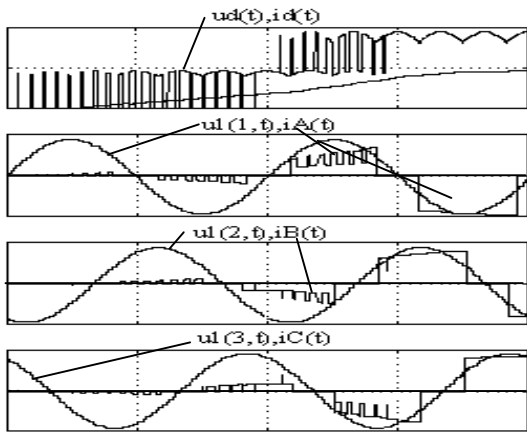
Моделювання електромагнітних процесів проведено для випадку симетричної трифазної напруги живлення та активно-індуктивного навантаження.

З метою порівняння наведеної моделі з моделлю, отриманою за методом БМФ, процес моделювання проведемо у два етапи. На першому з них приймемо вхідну мережу такою, що має нульові значеннями внутрішніх параметрів за величинами еквівалентних опорів та індуктивностей, а силові транзистори та діоди НПП подамо ідеальними ключами. Другий етап проведемо за умови установки нових завдань, які дозволяють урахувувати вплив еквівалентних параметрів мережі живлення та внутрішніх опорів ключових елементів на протікання електромагнітних процесів в НПП. Крім того, на вхідних силових шинах В відносно нульового проводу мережі установимо додаткові конденсатори для компенсації реакції еквівалентних індуктивностей на дію перервних струмів вхідних контурів НПП.

Результати першого етапу моделювання процесів відносно вихідної напруги  $u_d(t)$  НПП у процесі його “м’якого” пуску, струму  $i_d(t)$  навантаження та струмів  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$  у вхідних контурах трифазного джерела напруги в координатах його фазних напруг  $u_1(1,t)$ ,  $u_1(2,t)$ ,  $u_1(3,t)$  подані діаграмами на рис. 4.

Якщо силову частину розглянутого НПП подати у вигляді системи перетворення електроенергії, то за методом БМФ, подібно дослідженням, проведеним в [8], алгоритмічне рівняння роботи НПП запишемо у вигляді

$$u_d(t) = \frac{\sum_{p=1}^N u'_d(t) \psi(\alpha_p(t))}{k_T} \quad (1)$$



**Рис. 4. Діаграми напруги та струму навантаження, вхідних струмів та напруг на першому етапі моделювання**

де  $u_d(t)$  – миттєві значення вихідної напруги НПП, що містить  $N$  ІВН ( $N = 2$ );  $p = 1, 2, 3, \dots, N = L$  – номер зони регулювання вихідної напруги;  $u'_d(t)$  – миттєві значення вихідної напруги В;  $\psi(\alpha_p(t))$  – еквівалентний модулюючий вплив (ЕМВ), миттєві значення якого залежать від величини кутів управління  $\alpha_p(t)$ , за рахунок зміни яких забезпечується широтно-імпульсне регулювання вихідної напруги НПП.  $k_T$  – коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора.

Миттєві значення вихідної напруги  $u'_d(t)$  в (1) подамо виразом виду

$$u'_d(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 E_m \sin \left[ \omega_1 t + \frac{\pi(1-4(i-1))}{6} \right], \quad (2)$$

де  $E_m$ ,  $\omega_1 = 2\pi f_1$  та  $i = 1, 2, 3$  – відповідно амплітудне значення, кругова частота та номер фазної напруги мережі живлення.

З (2) випливає, що миттєві значення фазної напруги визначатимуться, як

$$u_1(i,t) = E_m \sin \left[ \omega_1 t + \pi \left[ 1 - 4(i-1) \right] / 6 \right]. \quad (3)$$

ЕМВ  $\psi(\alpha_p(t))$  запишемо співвідношенням виду

$$\psi(\alpha_p(t)) = \sum_2 \text{sign} \left[ \sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \varphi) \right] / 2, \quad (4)$$

де  $\omega_2 = 2\pi f_2$  та  $\varphi$  – відповідно кругова частота та початкова фаза ЕМВ.

Струм навантаження знайдемо з урахуванням (1) з рішення диференціального рівняння виду

$$D(t, y) = \frac{u_d(t) - Ry_0}{L}, \quad (5)$$

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

Рішення (5) відносно струму навантаження визначимо 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;  $D$  – символічний вектор струму навантаження.

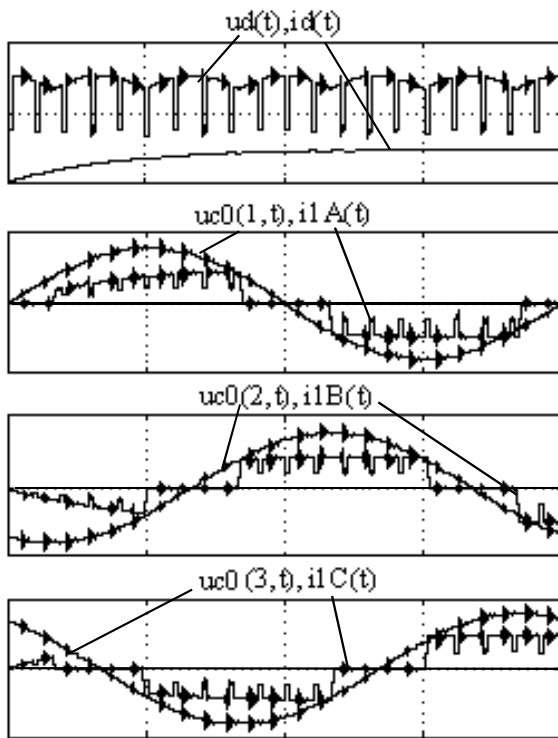
З урахуванням анодних струмів анодної та катодної груп вентилів В, за відомою з [6] методикою струми його вхідних контурів подамо, як

$$i(i,t) = \left[ f(n,t) - f(m,t) \right] \times \frac{1}{k_T} \sum_{p=1}^N i_d(t) \left| \psi(\alpha_p(t)) \right|, \quad (7)$$

де  $f(n,t)$  та  $f(m,t)$  – комутаційні функції, що збігаються за часом з інтервалами провідних станів діодів В;  $n = 1, 2, 3$  та  $m = 4, 5, 6$  – відповідно номери діодів анодної та катодної груп; причому, згідно алгоритму роботи В, для відповідних фаз мережі живлення обов'язковими є умови: якщо  $i = 1$ , то  $n = 1$ , а  $m = 4$ , якщо  $i = 2$ , то  $n = 2$ , а  $m = 5$ , якщо  $i = 3$ , то  $n = 3$ , а  $m = 6$ .

Вирази (1) – (7) подають математичну модель електромагнітних процесів у НПП з багатозонним регулюванням вихідної напруги і за рівних умов за завданнями відображаються діаграмами, які повністю повторюють діаграми, наведені на рис. 4. Проте найважливішим у цьому разі є те, що для реалізації математичної моделі за методом БМФ необхідно значно менших, порівняно з попередньою моделлю, трудових затрат, оскільки вона не потребує схемотехнічного супроводження і попереднього тестування.

На рис. 5 наведено фрагменти другого зі згаданих вище етапів моделювання відносно вихідної напруги  $u_d(t)$  НПП при фіксованому значенні кута керування, струму  $i_d(t)$  навантаження та струмів  $i_{1A}(t)$ ,  $i_{1B}(t)$ ,  $i_{1C}(t)$  у фазних проводах мережі в координатах напруг  $u_{c0}(i,t)$  на енергообмінних конденсаторах

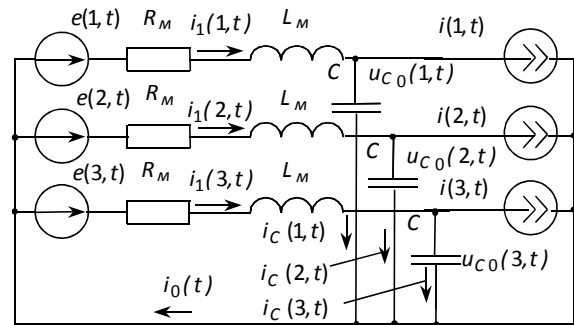


**Рис. 5. Діаграми напруги та струму навантаження, вхідних струмів та напруг на другому етапі моделювання**

У цьому разі потрібно відмітити позитивний чинник, який показує на те, що, для отримання наведених на рис. 5 діаграм, схемотехнічне супроводження моделі, розроблене на першому етапі моделювання, майже не змінюється

У середовищі MathCAD подібні дослідження проводяться при комплексному використанні методів БМФ, визначення еквівалентних опорів сталих структур НПП [7] та накладання в методиці моделювання електромагнітних процесів у системі “мережа живлення – НПП електроенергії” [9]. У такому разі, як і у даному прикладі, розглядаються НПП, що формують вихідну енергію в режимі джерела напруги, з припущеннями, що струми їхніх вхідних контурів залежать від характеру струмів навантаження і визначені в результаті попереднього моделювання за методом БМФ з урахуванням внутрішніх опорів ключових елементів [7]. В подальшому за методом накладання визначаються

струми  $i_1(i,t)$  у фазних проводах мережі та напруги  $u_{C0}(i,t)$  на конденсаторах, з використанням схеми заміщення, наведеної на рис. 6 [9].



**Рис. 6. Схема заміщення**

### Висновки

Порівняльний аналіз результатів моделювання у двох згаданих вище середовищах, проведений на другому етапі для НПП, який має вихідну потужність 15 кВт, показав розбіжність, яка не перевищує 10%. Основною причиною цього є те, що у процесі моделювання за методом БМФ не враховані втрати, визнані комутацією струмів діодами випрямлячів та силових ключів ІВН.

Таким чином, можемо зауважити, що розглянуті напрямки комп'ютерного аналізу НПП не суперечать один одному у процесі досліджень, а, навпаки, можуть вдало доповнювати один одного на різних етапах автоматизованого проектування НПП електроенергії. Так, розглянуті аспекти комп'ютерного аналізу НПП показують, що для оперативного вибору технічних рішень і попередньої оцінки їхніх функціональних можливостей у процесі проектуванні НПП електроенергії з багаторозгалуженими структурами перевагу має другий з розглянутих напрямків, що передбачає системні методи досліджень, які дозволяють проведення моделювання електромагнітних процесів без схемотехнічного супроводження, а, отже, з меншими трудовими затратами. При більш детальних дослідженнях НПП перевагу має перший напрямок, як такий що дозволяє уточнювати результати моделювання без зміни початкової моделі.

### Список посилань

1. Жемеров Г. Г. Компьютерное моделирование преобразовательной системы с компенсационным управляемым выпрямителем / Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 4. – Тематичний випуск. – 2002. – С. 59 – 62.

2. Халиков В. А. Исследование энергоэффективности источников сварочной дуги современными программными пакетами моделирования / В. А. Халиков, К. А. Липковский, В. М. Паханьян, А. Ф. Шатан // Технічна електродинаміка. -№ 3. -2004. -С. 17-22.
3. Переверзев А. В. Моделирование устройств силовой электроники / А. В. Переверзев, А. К. Тімовський, О. В. Василенко – Запоріжжя: ЗДІА, 1988. – 98 с.
4. Переверзев А. В. Макромоделирование силовых элементов преобразователей / А. В. Переверзев, С. Л. Шмалій // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехники. – Ч.3. – Тематичний випуск. – 2004. – С. 87-90.
5. Василенко О. В. Макромоделі на основі В-елементів для автоматизованого схемотехнічного проектування пристроїв силовой електроніки: Автореф. дис. канд. техн.наук: 05.09.12 / Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”. - К., 2002. - 20 с.
6. Макаренко М. П. Моделирование сетевых перетворювачів електроенергії модуляційного типу / М. П. Макаренко, В.І. Сенько, М. М. Юрченко – К.: ІЕД НАН України, 2002. - 140 с.
7. Макаренко М. П. Метод системного макромоделирования процесів у напівпровідникових перетворювачах модуляційного типу / М.П. Макаренко // Праці ІЕД НАНУ, 2003. - № 1 (4): 3б. наук. пр. – 2003. - с. 54-61.
8. 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.
9. Макаренко М. П. Моделирование електромагнітних процесів у системі “мережа живлення – напівпровідниковий перетворювач електроенергії” / М. П. Макаренко, В. І. Сенько, М. М. Юрченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Випуск 3/2004 (26). – С. 147-149.
10. 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.
11. 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. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч. 1. – С. 19–22.
12. Макаренко Н. П. Анализ электромагнитных процессов в двенадцатипульсном преобразователе с зонным регулированием выходного напряжения / Н. П. Макаренко, В. В. Михайленко, Н. Н. Юрченко // Вестник НТУ "Харьковский политехнический институт". "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2002. – Т. 1. – С. 233–234.
13. Макаренко М. П. Деякі аспекти комп'ютерного аналізу напівпровідникових перетворювачів електроенергії з багаторозгалуженими структурами / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2004. – Ч. 1. – С. 112–115.
14. Макаренко М. П. Алгоритмічно-структурні аспекти аналізу імпульсних перетворювачів змінної напруги / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко, В. В. Пілінський, В. І. Сенько, М.М. Юрченко // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2007. – Ч. 4. – С. 66–69.