

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Король Євген Ігорович

УДК 621.314.2

**ПОЛІПШЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗМІННОЇ НАПРУГИ З МІКРОПРОЦЕСОРНИМ  
ІМПУЛЬСНИМ КЕРУВАННЯМ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОНАГРІВУ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті  
“Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
**Кіпенський Андрій Володимирович**,  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
доцент кафедри  
промислової і біомедичної електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Липківський Костянтин Олександрович**,  
Інститут електродинаміки НАН України (м. Київ),  
завідувач відділом

кандидат технічних наук,  
**Бахнов Леонід Євгенович**,  
Державне підприємство  
“Науково дослідний інститут “ХЕМЗ” (м. Харків),  
завідувач відділом

Провідна установа – Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”  
Міністерства освіти і науки України,  
кафедра промислової електроніки

Захист відбудеться 02.07. 2004 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради  
Д 64.050.04 у Національному технічному університеті  
“Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного  
університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий 01.06. 2004 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми

У теперішній час відзначається зріст вимог, що пред'являються до напівпровідникових перетворювачів електроенергії і, зокрема, до перетворювачів змінної напруги (ПЗН), які використовуються для регулювання потужності в активному навантаженні. До таких вимог, насамперед, відноситься поліпшення якісних і енергетичних показників, електромагнітної сумісності з мережею живлення, розширення функціональних можливостей, а також забезпечення безупинної діагностики стану і селективного захисту при виникненні аварійних ситуацій.

Задоволення вказаних вимог зазвичай досягається за рахунок створення нових силових схем ПЗН чи використання нових способів керування.

При розробці нових силових схем ПЗН із поліпшеними енергетичними показниками найчастіше використовується збільшена кількість зазвичай цілком керованих силових ключів (СК), підвищення частоти їхньої комутації, а також використання силових активних фільтрів і силових трансформаторів з секціонованими обмотками та інше. Однак усі ці міри приводять до збільшення вартості систем перетворення електроенергії та зниження їх коефіцієнта корисної дії.

Для реалізації нових способів керування, що дозволяють поліпшити якісні показники і розширити функціональні можливості ПЗН, найчастіше використовують мікропроцесорні системи керування (МПСК). Однак такий підхід вимагає рішення задач сполучення мікропроцесора з силовою схемою перетворювача, синхронізації процесів керування з мережею живлення та керування ПЗН у реальному масштабі часу.

У нинішніх умовах стану енергоресурсів України перелічені проблеми є дуже актуальними, а для їхнього рішення в дисертаційній роботі пропонується комплексний підхід, заснований на поєднанні удосконалення силових схем ПЗН і застосування мікропроцесорних систем імпульсного керування й автоматичного регулювання, реалізованих з використанням положень теорії цифро-імпульсних та імпульсно-цифрових перетворень.

### Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Основні ідеї і результати, що представлені у дисертаційній роботі, використовувалися при проведенні науково-дослідних робіт з госпдоговірних тем:

- “Розробка тиристорного перетворювача з мікропроцесорним керуванням для регулювання температури” (договір з ВАТ “АТ НДІРВ”, м. Харків);
- “Розробка регулятора температури електронного для термоклеєвого палітурного апарату КАП-2”, “Розробка паспорту, інструкції з експлуатації і виготовлення дослідної партії регуляторів температури електронних РТЭ-200/1-2.0” (договори з ТОВ “РЕЙТИНГ”, м. Харків);
- “Розробка і дослідження енергетичних фільтрів для поліпшення якості електричної енергії” (спільний проект Українсько-польського науково-технічного співробітництва, м. Київ).

### Мета і задачі дослідження

Метою дисертаційної роботи є поліпшення якісних та енергетичних характеристик безтрансформаторних однофазних та трифазних ПЗН шляхом формування ступеневої кривої мережного струму у пристроях електронагріву за допомогою мі-

кропроцесорної системи, що реалізує фазоступеневе та комбіноване погоджене імпульсне регулювання.

Для досягнення поставленої мети в дисертації вирішувалися наступні основні задачі:

- аналіз принципів побудови силових комутаторів ПЗН, способів і систем керування, основних енергетичних і якісних показників;
- розробка групових ПЗН (ГПЗН) із мікропроцесорною системою погодженого керування, що забезпечують поліпшення якісних і енергетичних характеристик;
- розробка безтрансформаторних трифазних тиристорних ПЗН із підвищеним коефіцієнтом потужності, вибір оптимальних способів керування;
- моделювання за допомогою математичних і програмних моделей електромагнітних процесів у ПЗН для дослідження їх параметрів і характеристик;
- експериментальні дослідження зразків ПЗН у лабораторних і промислових умовах.

*Об'єктом дослідження є ПЗН для пристроїв електронагріву з поліпшеними параметрами і характеристиками.*

*Предметом дослідження є енергетичні і якісні параметри і характеристики ПЗН з мікропроцесорними системами імпульсного керування.*

*Методи досліджень.* При вирішенні поставлених задач використовувалися: методи гармонічного аналізу для визначення величин гармонік мережного струму; метод вузлових потенціалів для визначення миттєвих значень струмів при побудові математичних моделей силових схем ПЗН; графоаналітичний метод аналізу і синтезу на координатній площині статичних характеристик перетворювачів інформації та електричної енергії для рішення задач лінеаризації регулювальних характеристик ПЗН; різні пакети комп'ютерних програм для моделювання електромагнітних процесів у ПЗН.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

- запропоновано новий спосіб несиметричного фазового регулювання, що дозволяє регулювати потужність у секціонованому навантаженні з використанням тиристорних силових ключів при рівномірному завантаженні окремих секцій;
- сформульовано критерії вибору способів широтно-імпульсного регулювання для погодженого керування однофазними груповими ПЗН з секціонованим навантаженням та отримано універсальне рівняння регулювальної характеристики;
- розроблено оригінальний спосіб і мікропроцесорну систему імпульсного керування однофазним груповим ПЗН, які забезпечують рівномірність завантаження його секцій, лінійність регулювальної характеристики та відсутність реактивної потужності в усьому діапазоні регулювання;
- запропоновано схему трифазного безтрансформаторного тиристорного ПЗН, способи та універсальну мікропроцесорну систему імпульсного керування, що забезпечують високий коефіцієнт потужності в широкому діапазоні регулювання;
- винайдено спосіб оптимального керування трифазним безтрансформаторним тиристорним ПЗН, при якому формуються такі комбінації кутів керування силовими ключами, що забезпечують задане значення потужності в навантаженні з найкращим значенням будь-якого енергетичного показника;

- визначено вплив струму нульового проводу на коефіцієнт потужності трифазних безтрансформаторних ПЗН з фазоступеневим керуванням і запропоновані схемні рішення й алгоритми керування, що дозволяють регулювати потужність у навантаженні без нульового проводу.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- запропоновані принципи аналізу процесів у силових схемах за допомогою програмно-математичної моделі були рекомендовані для використання при пошуку оптимальних алгоритмів керування ПЗН із МПСК;

- для регулювання і стабілізації температури контейнера з клеєм термоклеєвого палітурного апарату “КАП-2”, що виготовляється в ТОВ “РЕЙТИНГ”, освоєне серійне виробництво електронного регулятора температури РТЭ-200/1-2.0 з мікропроцесорною системою імпульсного керування, що дозволяє ідентифікувати ряд аварійних ситуацій і має поліпшені якісні характеристики за рахунок використання двопозиційного релейного регулювання в сполученні з прогнозуванням стану об'єкта;

- для ВАТ “Автрамат” розроблено, виготовлено та впроваджено в промислову експлуатацію тиристорний перетворювач з цифровим керуванням для верстата по спайці полімерних плівкових матеріалів, що має лінійну регулювальну характеристику і забезпечує необхідний алгоритм прогріву нагрівальної губки верстата;

- для ВАТ “АТ НДІРВ” спроектовано і виготовлено тиристорний перетворювач з мікропроцесорним керуванням для регулювання температури в сухожаровій шафі ШВ-80, що дозволив за рахунок застосування погодженого керування окремими секціями значно підвищити коефіцієнт потужності перетворювача в усьому діапазоні регулювання, забезпечити високу точність підтримки температури об'єкту і широкі можливості, щодо завдання алгоритмів термообробки;

- запропонована схема безтрансформаторного трифазного тиристорного ПЗН з підвищеним коефіцієнтом потужності рекомендована при модернізації печей опору типу СШЗ-6.6/7М2, СН0-3×6×2110и2 та СНЗ-6×12×4/10М1 потужністю від 14.6 до 58 кВА, що використовуються в ВАТ “АТ НДІРВ” на ділянці термообробки.

**Особистий внесок здобувача** в розробку наукових результатів, що виносяться на захист:

- спосіб несиметричного фазового регулювання, що забезпечує рівномірне навантаження окремих секцій групового тиристорного ПЗН;

- оригінальний спосіб керування однофазним груповим ПЗН, що забезпечує рівномірність навантаження його секцій, лінійність регулювальної характеристики і відсутність реактивної потужності в усьому діапазоні регулювання;

- мікропроцесорна система імпульсного керування однофазним груповим ПЗН з мінімальною кількістю цифро-імпульсних перетворювачів;

- схема трифазного безтрансформаторного тиристорного ПЗН з підвищеним коефіцієнтом потужності;

- способи та алгоритми керування силовими схемами ПЗН, що забезпечують задане значення потужності в навантаженні з найкращим значенням будь-якого енергетичного показника;

- комп'ютерна модель трифазного тиристорного ПЗН з цифровою системою імпульсного керування;

- схемні рішення й алгоритми керування трифазними тиристорними ПЗН, що дозволяють регулювати потужність без використання нульового проводу за умов збереження високого значення коефіцієнта потужності.

### **Апробація результатів дисертації**

Матеріали дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: “Силовая електроніка та енергоефективність”, Україна, м. Алушта, 2001, 2002, 2003 р.; “Проблеми сучасної електротехніки”, Україна, м. Київ, 2000, 2002 р.; “MicroCAD”, Україна, м. Харків, 2001 р.; “Electrical drives and power electronics” (EDPE-2001), Slovak Republic, Podbanský, 2001.

Розробки експонувалися в складі експозицій НТУ “ХПИ” на ряді виставок м. Харкова і м. Києва у 2003 – 2004 рр.

### **Публікації**

Основні положення і результати досліджень викладено і опубліковано у 14 друкованих працях, з яких одна без співавторів, 13 статей у збірниках наукових праць і одна стаття в матеріалах науково-технічної конференції.

### **Структура та обсяг дисертації**

Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, висновків і двох додатків. Повний обсяг дисертації складає 193 сторінки, з них 59 ілюстрацій по тексту, 38 ілюстрацій на 20 сторінках; 6 таблиць по тексту, 1 таблиця на 1 сторінці; 2 додатку на 15 сторінках та 101 найменувань використаних літературних джерел на 10 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ**

**У вступі** обґрунтована актуальність теми, показана наукова новизна роботи, сформульовані мета й основні задачі дослідження, викладені наукові і практичні результати роботи.

**У першому розділі** проведено аналіз шляхів поліпшення характеристик ПЗН і встановлено, що для однофазних перетворювачів підвищення коефіцієнта потужності можливо за рахунок секціонування обмоток трансформатора (рис. 1,*а*) або за рахунок секціонування навантаження (рис 1,*б*). Підвищення коефіцієнта потужності в цих випадках досягається формуванням ступеневих кривих мережного струму завдяки системі погодженого керування СК секцій. При цьому зі збільшенням кількості секцій збільшується і коефіцієнт потужності.

*а)*

*б)*

*в)*

*г)*

Рис. 1. Варіанти силової частини перетворювача

У трифазних ПЗН при використанні силових трансформаторів поліпшення характеристик досягається за рахунок секціонування обмоток, використання міжфазних магнітних зв'язків і міжфазного енергообміну. У безтрансформаторних схемах поліпшення характеристик можливо за рахунок використання поєднання різних способів керування. Зокрема, в схемі трифазного ПЗН (рис. 1,в) на окремих етапах регулювання більш високий коефіцієнт потужності досягається при різних способах ШІР.

Додаткове підвищення коефіцієнта потужності в трифазному ПЗН виявилось можливим за рахунок використання фазоступеневого регулювання в схемі рис. 1,г, при якому крива напруги на навантаженні формується з відрізків фазної і лінійної напруг мережі. Для такої схеми можливо поліпшити окремі характеристики за допомогою зміни способу регулювання потужності.

Проведений аналіз різних способів керування дозволив скласти їх класифікацію, відповідно до якої всі способи були розділені на 4 основні групи. Перша група способів пов'язана зі зміною форми напруги в межах її періоду, друга група – зі зміною числа напівперіодів напруги живлення за кінцевий інтервал повторення, третя – зі зміною амплітуди напруги без зміни її форми. Четверта група містить у собі комбінації різних способів керування, що відносяться до перших трьох груп.

Найкращі енергетичні характеристики мають ПЗН, для яких використовуються способи регулювання, пов'язані зі зміною амплітуди вихідної напруги з використанням силового трансформатора з відпайками у вхідній та вихідній обмотках, однак при цьому вихідна потужність може регулюватися тільки дискретно.

Використання в ПЗН способів, пов'язаних зі зміною числа напівперіодів вихідної напруги за кінцевий інтервал часу, приводить до коливань температури об'єкта регулювання, зниження терміну служби нагрівальних елементів і перевантаження мережі електроживлення.

Способи регулювання ПЗН із багаторазовою комутацією силових ключів за напівперіод напруги мережі живлення мають високий рівень комутаційних втрат, вимагають використання цілком керованих СК, створюють перешкоди у радіочастотному діапазоні.

Для зниження комутаційних втрат у СК ПЗН, забезпечення плавного регулювання потужності в навантаженні, зниження коливань температури об'єкта регулювання варто використовувати способи з частотою комутації СК, що дорівнює подвоєній частоті напруги мережі живлення.

Серед відомих способів можна виділити 4 основних (табл. 1): два способи одностороннього ШІР і два способи двостороннього симетричного ШІР.

Особливістю першого способу є можливість реалізації СК на найдешевших силових напівпровідникових приладах – одноопераційних тиристорах, що дозволяють використати природну комутацію. Особливістю способів симетричного ШІР є те, що реактивна потужність дорівнює нулю в усьому діапазоні регулювання.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що поліпшення характеристик ПЗН для пристроїв електронагріву за рахунок використання трансформаторів і додаткових фільтрокомпенсуючих пристроїв знижує їхні техніко-економічні показники. Найбільш доцільно удосконалювати безтрансформаторні схеми перетворювачів і розробляти нові способи керування ними.

## Способи ШПР

Способи	Криві напруги на навантаженні	Діапазони кутів керування	Відносні кути керування	Відносна активна потужність	Відносна реактивна потужність
1		$0 \leq \alpha_1 \leq \pi$ $\beta_1 = \pi$	$\alpha_1^* = \frac{\alpha_1}{\pi}$	$P_1^* = 1 - \alpha_1^* + \frac{\sin 2\alpha_1^* \pi}{2\pi}$	$Q_1^* = \frac{1}{\pi} \sin^2 \alpha_1^* \pi$
2		$\alpha_2 = 0$ $0 \leq \beta_2 \leq \pi$ $\gamma_2 = \pi - \beta_2$	$\beta_2^* = \frac{\beta_2}{\pi}$ $\gamma_2^* = 1 - \beta_2^*$	$P_2^* = 1 - \gamma_2^* + \frac{\sin 2\gamma_2^* \pi}{2\pi}$	$Q_2^* = -\frac{1}{\pi} \sin^2 \gamma_2^* \pi$
3		$0 \leq \alpha_3 \leq \frac{\pi}{2}$ $\beta_3 = \pi - \alpha_3$	$\alpha_3^* = \frac{2\alpha_3}{\pi}$	$P_3^* = 1 - \alpha_3^* + \frac{\sin \alpha_3^* \pi}{\pi}$	$Q_3^* = 0$
4		$0 \leq \alpha_4 \leq \frac{\pi}{2}$ $\beta_4 = \pi - \alpha_4$	$\alpha_4^* = \frac{2\alpha_4}{\pi}$	$P_4^* = 1 - \alpha_4^* - \frac{\sin \alpha_4^* \pi}{\pi}$	$Q_4^* = 0$
5		$0 \leq \alpha_5 \leq \frac{\pi}{2}$ $\beta_5 = \pi - \alpha_5$	$\alpha_5^* = \frac{2\alpha_5}{\pi}$	$P_5^* = 1 - \alpha_5^*$	$Q_5^* = \frac{1}{\pi} \sin \alpha_5^* \pi$
6		$0 \leq \alpha_6 \leq \frac{\pi}{2}$ $\beta_6 = \pi - \alpha_6$	$\alpha_6^* = \frac{2\alpha_6}{\pi}$	$P_6^* = 1 - \alpha_6^*$	$Q_6^* = -\frac{1}{\pi} \sin \alpha_6^* \pi$

В другому розділі розглянуті питання поліпшення характеристик однофазних ПЗН, для яких доцільно використовувати секціонування навантаження. При цьому однією з основних вимог є рівномірне завантаження секцій навантаження, а для регулювання потужності в окремих секціях може використовуватися комбінація будь-яких способів ШПР.

На основі комбінації першого способу ШПР і релейного регулювання запропонований новий спосіб, що одержав назву несиметричного фазового керування. При такому способі інтервал комутації СК складає стільки напівперіодів напруги мережі живлення, скільки секцій містить навантаження. Регулювання струму в кожній секції здійснюється на одному напівперіоді при цілком відкритих чи закритих ключах на інших напівперіодах. Інтервали комутації СК секцій зміщені відносно один одного на кут  $\pi$  рад.

Таке керування може бути реалізоване в схемі (рис. 1,б), де СК можуть бути реалізовані як зустрічно-паралельно з'єднані тиристори. Часові діаграми струмів у секціях двосекційного навантаження  $i_1, i_2$  та у мережі  $i_M$  на першому (а) і другому (б) етапах регулювання наведені на рис. 2.

Дослідження енергетичних характеристик такого ПЗН (рис. 3) показали значне підвищення коефіцієнтів потужності  $\lambda$ , зсуву фази  $K_3$ , спотворювань  $K_C$  і зниження пасивної потужності  $Q_{II}^* = \sqrt{S^{*2} - P^{*2}}$ , де  $S^*$  – відносна повна потужність, що спо-



живається з мережі,  $P^*$  – відносна активна потужність в навантаженні. Зокрема коефіцієнт потужності двосекційного ПЗН  $\lambda_2$  значно вище ніж односекційного  $\lambda_1$  (рис. 3,а). Крім того виявляється значне зниження рівня гармонік споживаного струму (рис. 3,в). Однак істотним тут залишається рівень споживаної з мережі реактивної потужності  $Q^*$  (рис. 3,б), а регульовальна характеристика виявляється нелінійною.

а)

б)

Рис. 2. Часові діаграми струмів при регулюванні потужності в секціях навантаження ПЗН

а)

б)

в)

Рис. 3. Енергетичні характеристики групового ПЗН

Подальші дослідження показали, що зниження споживання реактивної потужності можливо за рахунок використання комбінації різних способів ШІР, для реалізації яких необхідні цілком керовані СК. Схема групового ПЗН з мікропроцесорною системою імпульсного керування (МПСІК), що дозволяє реалізувати будь-яку комбінацію з відомих способів ШІР, наведена на рис. 4. Тут імпульси керування формуються за допомогою цифро-імпульсних перетворювачів (ЦІП) секцій, що синхронізуються від блоку синхронізації з мережею (БСМ), з урахуванням сигналу завдання  $N_{ЗAB}$  та сигналу зворотного зв'язку  $N_{ЗЗ}$ . При цьому регульовальна характеристика

секції перетворювача при кожному з розглянутих способів ШПР може бути розрахована за універсальним виразом:

$$P = \frac{2U^2}{R\pi} \int_{\psi_n + \alpha_n}^{\psi_n + \beta_n} \sin^2 \nu d\nu = \frac{U^2}{R} \left[ \frac{\beta_n - \alpha_n}{\pi} + \frac{\sin 2\psi_n + \alpha_n - \sin 2\psi_n + \beta_n}{2\pi} \right],$$

де  $n$  – номер способу ШПР (табл. 1).

Для приведеної схеми сформульовані основні умови вибору комбінації способів ШПР для погодженого керування СК:

- рівність нулю реактивної потужності в усьому діапазоні регулювання потужності в навантаженні;
- ідентичність регулювальних характеристик перетворювачів секцій для забезпечення рівномірного завантаження секцій ГПЗН;
- лінійність регулювальної характеристики, що дозволяє поліпшити якісні характеристики перетворювача.

Рис. 4. Груповий двохсекційний ПЗН із МПСІК

Першій умові задовольняють комбінації 1 і 2 способів ШПР та 3 і 4 способів (табл. 1).

Комбінація 1 і 2 способів ШПР забезпечує рівномірність завантаження секцій, однак результуюча регулювальна характеристика виявляється нелінійною.

Комбінація 3 і 4 способів ШПР дозволяє одержати лінійну результуючу регулювальну характеристику, однак завантаження секцій виявляється нерівномірним.

Усунення зазначених недоліків в обох випадках може бути досягнуте за рахунок лінеаризації регулювальних характеристик одиночних ПЗН. Однак при рішенні задачі лінеаризації на програмному рівні необхідні додаткові витрати часу на обчислення кута керування.

Спеціально для забезпечення лінійної регулювальної характеристики без додаткових програмних витрат запропоновані два способи ШПР, що є варіантами 4-го способу (табл. 1), які одержали назву несиметричного двостороннього регулювання. Відповідно до цих способів формується фазовий зсув керуючих імпульсів на  $\pi/4$  – 5 спосіб на  $3\pi/4$  – 6 спосіб. Комбінація таких способів забезпечує лінійну регулювальну характеристику при рівномірному завантаженні секцій ПЗН, та реактивну потужність, що дорівнює нулю в усьому діапазоні регулювання.

При реалізації нових способів регулювання були розглянуті різні підходи до формування імпульсів керування. Найкращим виявився підхід, при якому відлік кутів керування відробляється послідовно. Для реалізації такого підходу було запропоновано використовувати ЦП з послідовним відліком, що забезпечує перетворення цифрового коду в імпульсну послідовність з використанням двох лічильників без ускладнення БСМ.

Для розглянутого ПЗН із МПСІК, що реалізує комбінацію 5 і 6 способів ШПР, були зроблені розрахунки всіх енергетичних характеристик і проаналізовано гармонійний склад споживаного з мережі струму. Дослідження показали додаткове поліпшення таких енергетичних характеристик як коефіцієнт зсуву, він виявляється рівним одиниці, та реактивна потужність, що дорівнює нулю. Крім того, зроблені розрахунки дозволили довести, що для групового перетворювача залежності коефіцієнта потужності, повної і пасивної потужностей, споживаних з мережі, від активної потужності в навантаженні також як і для одиночного ПЗН не залежать від комбінації способів регулювання, ідентичні характеристикам, що мають місце при секціонуванні обмоток силового трансформатора, і визначаються за виразами, наведеними у табл. 2.

Таблиця 2

### Енергетичні характеристики двосекційного ПЗН

Одиночний ПЗН	Двосекційний ПЗН	
	перший етап регулювання	другий етап регулювання
$\lambda = \frac{P^*}{S^*} = \sqrt{P^*}$	$\lambda = \frac{\sqrt{2} \cdot P^*}{\sqrt{3 \cdot P^* - 1}}$	$\lambda = \sqrt{2 \cdot P^*}$
$S^* = I_M^* = \sqrt{P^*}$	$S^* = I_M^* = \sqrt{\left(\frac{3}{2} \cdot P^* - \frac{1}{2}\right)}$	$S^* = \sqrt{\frac{P^*}{2}}$
$Q_i^* = \sqrt{P^* - P^{*2}}$	$Q_i^* = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot P^* - \frac{1}{2} - P^{*2}}$	$Q_i^* = \sqrt{\frac{P^*}{2} - P^{*2}}$

Розроблений перетворювач рекомендується для однофазних пристроїв електронагріву, що споживають струм до 16 А.

При більшій потужності пристроїв електронагріву доцільно використовувати трифазні схеми ПЗН, для яких найбільш актуальним є рішення питань поліпшення енергетичних характеристик і, зокрема, підвищення коефіцієнта потужності.

**У третьому розділі** показані шляхи поліпшення енергетичних характеристик трифазних ПЗН, для яких найбільш ефективним способом підвищення коефіцієнта потужності є використання фазоступеневого регулювання.

Розроблено нову силову схему (рис. 5) безтрансформаторного ПЗН, що дозволяє формувати напругу на навантаженні з відрізків фазного і двох лінійних напруг. Оскільки потужність таких перетворювачів у більшості випадків досить велика, СК виконуються як зустрічно-паралельно з'єднані тиристри. Наявність у схемі великої кількості СК дозволяє регулювати потужність різними способами. Для дослідження енергетичних характеристик при різних способах регулювання розроблена програмно-математична модель, що реалізована мовою програмування PASCAL. Розрахунок струмів у схемі виконується з використанням методу вузлових потенціалів.

Рис. 5. Схема безтрансформаторного трифазного тиристорного ПЗН

Дослідження різних способів керування, проведені за допомогою моделі, показали, що найбільш простим і ефективним є регулювання потужності в навантаженні в 3 етапи (рис. 6, де змінення потужності в навантаженні фази А на кожному із етапів відповідає закресленій зоні). При такому способі регулювання розрахункові вирази для кутів керування виявляються досить простими, фазові і регулювальні характеристики безперервні, і спостерігається підвищення коефіцієнта потужності (крива 2, рис. 7) відносно відомої схеми (рис. 1,2) перетворювача (крива 1, рис. 7). Так, середнє значення коефіцієнта потужності в початковому діапазоні регулювання збільшується на 11 %. Крім того, розширюється діапазон регулювання потужності і при середньому значенні коефіцієнта потужності 0,94, виявляється в 1,33 рази більшим порівняно зі схемою, що наведена на рис. 1,в.

Подальші дослідження виявили можливість підвищення коефіцієнта потужності за рахунок збільшення кількості етапів регулювання. Запропонований ще один спосіб

регулювання потужності в 5 етапів, що дозволяє без істотного ускладнення алгоритму керування досягнути додаткового підвищення коефіцієнта потужності на окремих етапах регулювання (крива 3, рис. 7). При такому способі регулювальна характеристика залишається безперервною, однак виникають розриви у фазових характеристиках перетворювача, що трохи ускладнює перехід від одного етапу регулювання до іншого.

У результаті дослідження різних способів регулювання був запропонований оптимальний спосіб керування, при якому критерієм оптимізації може бути обраний кожний з енергетичних показників ПЗН. Суть оптимального регулювання полягає у формуванні такої комбінації кутів керування, при якій задана потужність у навантаженні забезпечується при найкращому з можливих значень

Рис. 6. Спосіб регулювання потужності в навантаженні в три етапи

того чи іншого енергетичного показника перетворювача.

Рис. 7. Коефіцієнт потужності ПЗН при різних способах регулювання потужності в навантаженні

Спосіб керування відповідний оптимізації коефіцієнта потужності дозволяє додатково підвищити його значення на окремих етапах регулювання (крива 4, рис. 7) і забезпечити рівність його середнього значення 0,94 на 80 % діапазону регулювання. При оптимізації коефіцієнта зсуву його середнє значення було забезпечено рівним 0,99 на 25 % діапазону регулювання, при оптимізації коефіцієнта спотворювання його середнє значення дорівнює 0,99 на 45 % діапазону регулювання. При таких способах керування додатково забезпечується лінійність регулювальної характеристики,

однак, форма кривої напруги на навантаженні при зміні потужності навіть у один відсоток може істотно відрізнятися. Така ситуація вимагає при переході від одного значення потужності до іншого обов'язкового вимикання всіх СК відповідного навантаження. Це, у свою чергу, приводить до виникнення провалів потужності в навантаженні, що викликає коливання температури в малоінерційних системах, а також ускладнює забезпечення динамічних режимів термообробки. У таких випадках може бути рекомендований перший спосіб регулювання (рис. 6).

Всі описані способи можуть бути реалізовані за допомогою розробленої МПСІК (рис. 8).

Рис. 8. Функціональна схема універсальної МПСІК

Особливістю цієї системи керування є спрощення БСМ, що містить три ідентичних канали, і порядок визначення чисел, що записуються у ЦП для перетворення в часові інтервали і відповідають кутам керування.



ПЗН регулювальна характеристика була лінеаризована на програмному рівні, що дозволило забезпечити необхідну точність підтримки температури без додаткового ускладнення системи керування.

При розробці ПЗН для регулювання температури в сухожаровій шафі було необхідне вирішення таких задач, як забезпечення складних режимів термообробки, у тому числі багатоетапного програмованого режиму, а також поліпшення енергетичних характеристик перетворювача. Для побудови системи керування такого ПЗН був обраний запропонований спосіб несиметричного фазового регулювання для трисекційного навантаження. Даний перетворювач був впроваджений у промислову експлуатацію в ВАТ “АТ НДІРВ”.

Для цього ж підприємства було рекомендовано використати розроблений трифазний тиристорний ПЗН при проведенні модернізації електропечей опору в цеху термообробки, що запланована на період з 2004 по 2005 р. З метою перевірки працездатності перетворювача й оцінки впливу реальних параметрів ланцюгів на його роботу було побудовано модель ПЗН у програмно-математичному пакеті MatLab, що реалізує спосіб регулювання потужності в три етапи. Вибір елементів схеми здійснювався, виходячи з наступних параметрів перетворювача: сумарна потужність 100 кВА, живлення від мережі 380В, 50 Гц, потужність трансформатора підстанції 1 МВА.

Аналіз отриманих енергетичних характеристик ПЗН показав, що на третині всього діапазону регулювання потужності в навантаженні коефіцієнт потужності перетворювача без використання якихось додаткових засобів компенсації і фільтрації дорівнює 0,95, крім того, у широкому діапазоні регулювання (близько 83%) коефіцієнт потужності виявляється не нижче 0,85 і в середньому дорівнює 0,92. Зіставлення результатів, отриманих за допомогою програмно-математичної моделі ідеального ПЗН і моделі в пакеті MatLab, показали, що відмінності в параметрах неістотні і складають не більш 1%.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновані нові рішення в області напівпровідникових перетворювачів електроенергії, що дозволяють поліпшити характеристики перетворювачів змінної напруги (ПЗН), які застосовуються для регулювання потужності в активному навантаженні. У результаті проведених досліджень отримані наступні наукові результати:

1. Проведений аналіз принципів побудови ПЗН та способів керування довів, що для поліпшення якісних характеристик ПЗН у даний час найбільш доцільно використовувати мікропроцесорні системи імпульсного керування, а для поліпшення енергетичних характеристик варто удосконалювати силові схеми і використовувати способи регулювання, при яких формується ступенева крива мережного струму.

2. Запропонований спосіб несиметричного фазового регулювання дозволив використовувати в груповому ПЗН (ГПЗН) тиристорні силові ключі і забезпечити рівномірне завантаження його окремих секцій.

3. Використання запропонованих критеріїв при виборі комбінацій різних способів широтно-імпульсного регулювання (ШІР) для регулювання потужності в секціях однофазного ГПЗН дозволяє додатково поліпшити якісні й енергетичні харак-

теристики перетворювача, а отриманий універсальний вираз для регулювальних характеристик одиночного перетворювача – розрахувати їх при будь-якому способі ШПР.

4. Розроблено оригінальний спосіб і мікропроцесорна система імпульсного керування однофазним ПЗН забезпечують рівномірність завантаження його секцій, лінійність регулювальної характеристики і відсутність реактивної потужності в усьому діапазоні регулювання.

5. Зроблені розрахунки для двосекційного перетворювача довели, що при погодженому керуванні залежності коефіцієнта потужності, пасивної та повної потужностей, що споживаються з мережі, від активної потужності в навантаженні не залежать від комбінації способів ШПР.

6. Розроблена нова схема трифазного безтрансформаторного тиристорного ПЗН дозволяє підвищити коефіцієнт потужності в усьому діапазоні регулювання у порівнянні з відомими схемами перетворювачів.

7. Запропонований спосіб регулювання потужності в 3 етапи має безперервні фазові і регулювальні характеристики при забезпеченні високого значення коефіцієнта потужності.

8. Запропонований спосіб оптимального керування забезпечує задане значення потужності в навантаженні з найкращим з можливих значень будь-якого енергетичного показника.

9. Розроблена універсальна мікропроцесорна система імпульсного керування дозволяє реалізувати кожний з запропонованих способів регулювання потужності в розробленій новій схемі трифазного тиристорного ПЗН.

10. Облік струму в нульовому проводі трифазного ПЗН при розрахунках енергетичних характеристик показав деяке зниження коефіцієнта потужності. Запропоновані силові схеми трифазних ПЗН дозволяють регулювати потужність у навантаженні без використання нульового проводу при забезпеченні високого значення коефіцієнта потужності.

11. Результати дисертаційної роботи впроваджені на підприємствах м. Харкова: ВАТ “АТ НДІВР”, ТОВ “РЕЙТИНГ”, ВАТ “Автрамат”. Експериментальні дослідження з пробних зразків розроблених перетворювачів та програмно-математичних моделей довели ефективність секціонування навантаження в однофазних ПЗН і використання фазоступеневого регулювання в трифазних ПЗН.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Кипенский А.В., Архиев И.П., Король Е.И., Аль-Фарах Р.Х.О. Линеаризация регулировочных характеристик однофазных полупроводниковых преобразователей переменного напряжения средствами микропроцессорного управления // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 43. – С. 108-118.

Здобувачу дисертації належить розробка принципу лінеаризації регулювальної характеристики ПЗН апаратним засобом.

2. Кипенский А.В., Архиев И.П., Король Е.И., Аль Ауран Х.С. Выбор способов широтно-импульсного регулирования для согласованного управления групповым преобразователем переменного напряжения с секционированной нагрузкой //



Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вип. 102. – С. 52 - 56.

Здобувачем зроблено аналіз комбінації різних способів ШПР для узгодженого керування груповим ПЗН.

3. Король Е.И. Тиристорный преобразователь мощности с цифровым управлением для регулирования температуры нагревательной губки станка // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. – Вип. 1. – С. 113-119.

4. Архиев И.П., Кипенский А.В., Колесник Ю.И., Король Е.И. Групповой преобразователь переменного напряжения с микропроцессорным управлением и улучшенными характеристиками для устройств электронагрева // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. – Вип. 9. – Т.4. – С. 3-13.

Здобувачем зроблено аналіз енергетичних показників ПЗН із мінімальною кількістю цифро-імпульсних перетворювачів.

5. Кипенский А.В., Архиев И.П., Король Е.И. Регулировочные характеристики и энергетические параметры одиночного полупроводникового преобразователя переменного напряжения с активной нагрузкой // Технічна електродинаміка. – Київ, 1999. – Тематичний випуск. Системи керування та контролю напівпровідникових перетворювачів. – С. 49-52.

Здобувачем запропоновані два способи ШПР з лінійною регульовальною характеристикою.

6. Кипенский А.В., Архиев И.П., Король Е.И. Улучшение технико-экономических показателей полупроводниковых преобразователей переменного напряжения с активной нагрузкой средствами микропроцессорного управления // Технічна електродинаміка. – Київ, 2000. – Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч.5. – С. 56-59.

Здобувачем розроблено оригінальний спосіб керування однофазним груповим ПЗН, що забезпечує рівномірність завантаження його секцій, лінійність регульовальної характеристики і рівність нулю реактивної потужності у всьому діапазоні регулювання.

7. Сокол Е.И., Архиев И.П., Кипенский А.В., Король Е.И. Повышение коэффициента мощности бестрансформаторного трёхфазового тиристорного преобразователя переменного напряжения с комбинированным управлением // Технічна електродинаміка. – Київ, 2001. – Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.2. – С. 57-60.

Здобувачем здійснене зіставлення способів керування силовими ключами та проведений аналіз енергетичних характеристик трифазного ПЗН при таких способах.

8. Сокол Е.И., Архиев И.П., Кипенский А.В., Король Е.И. Трёхфазный тиристорный преобразователь переменного напряжения с повышенным коэффициентом мощности // Технічна електродинаміка. – Київ, 2002. – Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Ч.1. – С. 54-59.

Здобувачем синтезовані алгоритми та розроблена мікропроцесорна система імпульсного керування силовими схемами ПЗН, що забезпечують максимальний кое-

фіцієнт потужності при заданих значеннях потужності в навантаженні у всьому діапазоні регулювання.

9. Архиреев И.П., Кипенский А.В., Король Е.И. Энергетические параметры трехфазных тиристорных преобразователей переменного напряжения с фазоступенчатым регулированием // Технічна електродинаміка. – Київ, – 2002. – Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.1. – С. 29-32.

Здобувачу належать схемні рішення й алгоритми керування трифазними тиристорними ПЗН, що дозволяють регулювати потужність без нульового проводу за умов збереження високого значення коефіцієнта потужності.

10. Сокол Е.И., Архиреев И.П., Кипенский А.В., Король Е.И. Однофазный тиристорный регулятор температуры с секционированной нагрузкой // Технічна електродинаміка. – Київ, 2002. – Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Ч.4. – С. 67-70.

Здобувачем наведені результати досліджень розробленого ним та виготовленого на кафедрі “Промислова і біомедична електроніка” ПЗН для сухожарової шафи ШВ-80.

11. Архиреев И.П., Король Е.И. Однофазный бестрансформаторный преобразователь переменного напряжения с фазоступенчатым регулированием // Технічна електродинаміка. – Київ, 2003. – Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.4. – С. 25-28.

Здобувачем зроблено аналіз процесів в ПЗН при використанні фазоступеневого регулювання.

12. Сокол Е.И., Архиреев И.П., Кипенский А.В., Король Е.И. Улучшение показателей и характеристик однофазных полупроводниковых преобразователей переменного напряжения // Электротехника. – М.: ЗАО “Знак”. – 2003. – №3. – С. 66-70.

Здобувачу належить розробка мікропроцесорної системи імпульсного керування однофазним груповим ПЗН.

13. Долбня В.Т., Кипенский А.В., Король Е.И. Линеаризация регулировочной характеристики преобразователя переменного напряжения при различных способах широтно-импульсного регулирования // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. – Вип. 1. – С. 55-68.

Здобувачу дисертації належить розробка принципу лінеаризації регулювальної характеристики ПЗН на програмному рівні.

14. Sokol E.I., Kipensky A.V., Arkhieroyev I.P. Korol E.I. Increase of power factor of 3-phase voltage converters // 14th International Conf. EDPE'01. – Podbanský (Slo-vakia). – 2001. – P. 346-349.

Здобувачем запропоновано схему трифазного безтрансформаторного тиристорного ПЗН із підвищеним коефіцієнтом потужності.

## АНОТАЦІЇ

**Король Є.І. Поліпшення характеристик напівпровідникових перетворювачів змінної напруги з мікропроцесорним імпульсним керуванням для пристроїв електронагріву. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття ученого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” – Харків – 2004.

Дисертація присвячена поліпшенню якісних і енергетичних характеристик безтрансформаторних перетворювачів змінної напруги (ПЗН), що застосовуються для регулювання потужності в активному навантаженні.

Для однофазних групових тиристорних ПЗН запропоновано спосіб несиметричного фазового регулювання, що забезпечує рівномірне завантаження його секцій. Запропоновані і досліджені оригінальний спосіб широтно-імпульсного регулювання і мікропроцесорна система імпульсного керування (МПСІК) для двосекційного ПЗН, що забезпечують рівномірність завантаження секцій, лінійність регулювальної характеристики і відсутність реактивної потужності в усьому діапазоні регулювання.

Для потужних пристроїв електронагріву розроблена нова схема трифазного тиристорного ПЗН, що дозволяє підвищити коефіцієнт потужності завдяки використанню фазоступеневого регулювання. Запропоновані кілька способів керування такою схемою та проведені її дослідження. Розроблено МПСІК, що дозволяє реалізувати кожний з запропонованих способів регулювання потужності в новій схемі ПЗН. Зроблено розрахунки енергетичних характеристик ПЗН при обліку струму в нульовому проводі і запропоновані силові схеми, що дозволяють регулювати потужність у навантаженні без його використання.

Представлено результати експериментальних досліджень розроблених перетворювачів, що впроваджені на підприємствах м. Харкова.

**Ключові слова:** перетворювач змінної напруги, реактивна потужність, якість електроенергії, коефіцієнт потужності, електронагрів, секціонування навантаження, фазоступенева регулювання.

**Король Е.И. Улучшение характеристик полупроводниковых преобразователей переменного напряжения с микропроцессорным импульсным управлением для устройств электронагрева. – Рукопись.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”- Харьков- 2004.

Диссертация посвящена улучшению качественных и энергетических характеристик однофазных и трехфазных преобразователей переменного напряжения (ППН), применяемых для регулирования мощности в активной нагрузке, средствами микропроцессорных систем импульсного управления.

Приведен анализ путей улучшения качественных и энергетических характеристик ППН, показавший целесообразность использования микропроцессорных систем импульсного управления, совершенствования силовых схем и применения способов регулирования, при которых формируется ступенчатая кривая сетевого тока.

Для однофазных ППН предложен способ несимметричного фазового регулирования, который позволяет использовать в групповом ППН тиристорные силовые ключи и обеспечить равномерную загрузку его отдельных секций. Проведены ис-

следования энергетических характеристик двухсекционного ППН при использовании такого способа регулирования. Также предложены и исследованы оригинальный способ широтно-импульсного регулирования (ШИР) и микропроцессорная система импульсного управления для двухсекционного ППН, обеспечивающие равномерность загрузки секций преобразователя, линейность регулировочной характеристики и равенство нулю реактивной мощности во всем диапазоне регулирования. Получено универсальное выражение, позволяющее рассчитать регулировочную характеристику одиночного ППН при всех описанных способах ШИР.

Для мощных устройств электронагрева разработана новая схема бестрансформаторного трехфазного тиристорного ППН, позволяющая повысить коэффициент мощности во всем диапазоне регулирования по сравнению с известными схемами преобразователей. Предложены несколько способов управления такой схемой и проведены исследования энергетических характеристик при таких способах. Наиболее простым является способ фазоступенчатого регулирования мощности в три этапа, при котором расчетные выражения для углов управления оказываются довольно простыми, а фазовые и регулировочные характеристики непрерывными. Представлен оптимальный способ регулирования, суть которого заключается в формировании такой комбинации углов управления, при которой заданная мощность в нагрузке обеспечивается при наилучшем из возможных значений того или иного энергетического показателя преобразователя. Разработана микропроцессорная система импульсного управления, позволяющая реализовать любой из предложенных способов регулирования мощности в новой схеме ППН. Произведены расчеты энергетических характеристик ППН при учете тока в нулевом проводе и предложены силовые схемы, позволяющие регулировать мощность в нагрузке без его использования.

Представлены результаты экспериментальных исследований, разработанных и внедренных на ряде предприятий г. Харькова преобразователей, которые доказали эффективность секционирования нагрузки, линейаризации регулировочной характеристики, а также использования микропроцессорных систем управления и фазоступенчатого регулирования в преобразователях переменного напряжения.

**Ключевые слова:** преобразователь переменного напряжения, реактивная мощность, качество электроэнергии, коэффициент мощности, секционирование нагрузки, фазоступенчатое регулирование.

**Korol E.I. Improving semiconductor AC-voltage converters characteristics with microprocessor pulse controlling for heating devices.** – Manuscript.

Thesis for candidate degree of technical sciences of speciality 05.09.12 – Semiconductor converters of electric energy – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute” – Kharkov - 2004.

Following thesis work is dedicated to qualitative and power characteristics improvement of single and 3-phase AC-voltage converters that are utilized to control power within active load.

For single phased thyristor AC-voltage converters a new asymmetrical phase regulation method suggested, which provides even load for separate sections. Developed and researched original method of pulse-width modulation (PWM) and microprocessor pulse

control system for dual section AC-voltage converters, providing uniform load for converters sections, linearity of control characteristics and equality of reactive power to zero all over the control range.

For powerful devices of electrical heating a new non-transformer 3-phase thyristor AC-voltage converter schematic have been developed which allows increasing power factor all over the controlling range. Several methods to phase-stepped control this scheme have been suggested and power characteristics researches have been carried out as well. Microprocessor pulse control system, which allows implementing any of the suggested power controlling methods in new AC-voltage converters have been developed. Calculations of converters power characteristics have been done taking current of zero cable into account and new power schemes have been suggested allowing to control power within load without it's usage.

Experimental research results of developed and applied AC-voltage converters are provided on several companies in Kharkov city.

**Key words:** AC-voltage converters, reactive power, energy quality, power factor, electrical heating, load sectioning, phase-stepped control.

Відповідальний за випуск к.т.н., Архієреєв І.П.

Підписано до друку 17 травня 2004 р. Формат видання 145×215.  
Формат паперу 60 × 90/16. Папір офсетний. Друк різнографічний.  
Ум. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Замовлення № 420438

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво №04058841Ф0050331 від 21.03.2001р.  
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 4/10.