

ВІДГУК офіційного опонента

на дисертаційну роботу Яськіва Володимира Івановича
«Високоєфективні напівпровідникові перетворювачі електроенергії на основі
високочастотних магнітних підсилювачів», яка представлена на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

Актуальність теми дисертації.

Розвиток систем зв'язку, сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій, радіоелектронних систем широкого спектру призначення, інших високотехнологічних систем вимагає відповідного кількісного та якісного рівня їх енергетичного забезпечення.

Актуальним є вирішення задачі створення загальної концепції побудови високоєфективних компактних високочастотних перетворювачів електроенергії з заданим діапазоном вихідних потужностей (десятки Вт – одиниці кВт) та набором експлуатаційних характеристик: високими динамічними характеристиками, високою якістю та заданими діапазонами регулювання вихідних напруг та струмів, низьким рівнем електромагнітних завад, радіаційною та механічною стійкістю, високим коефіцієнтом корисної дії та високим рівнем уніфікації.

Новітні високочастотні магнітні матеріали з прямокутною петлею гістерезису стали передумовою подальшого розвитку техніки магнітного перетворення параметрів електроенергії. Сучасні магнітом'які аморфні сплави характеризуються високим коефіцієнтом прямокутності, малою напруженістю поля повного перемагнічування, високим рівнем індукції насичення. Завдяки високому рівню радіаційної та механічної стійкості, надійності, ефективності, електромагнітної сумісності, а також простоті реалізації схемних рішень вони використовуються в ролі осердь високочастотних магнітних підсилювачів (ВМП), які виконують функції силових ключів в регуляторах та стабілізаторах постійної напруги.

Простота схемотехнічних рішень, висока ефективність, можливість реалізації багатоканальних джерел живлення з рівноцінними та незалежними вихідними каналами, а також простота реалізації керованих перетворювачів електроенергії на високочастотних магнітних підсилювачах обумовлюють їх використання для живлення радіопередавальних та приймальних пристроїв систем зв'язку, бортової та наземної апаратури космічного призначення, засобів інформаційних технологій, в атомній енергетиці, медичній техніці, електрозварюванні тощо. Перспективним є використання регуляторів на основі ВМП в сучасних системах безпроводної передачі електроенергії.

З огляду на вище сказане, актуальною є науково-прикладна проблема вдосконалення методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в

напівпровідникових перетворювачах електроенергії на високочастотних магнітних підсилювачах.

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

Теоретичні дослідження та практична робота за темою дисертації проводилися при виконанні планових НДР у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за тематикою розробки та дослідження високоефективних напівпровідникових перетворювачів електроенергії в діапазоні вихідних потужностей десятки Вт–1 кВт для широкого класу споживачів.

Базовими для підготовки та подання дисертаційної роботи були НДР, науковим керівником яких був здобувач: ДІ 58-94 «Розробка систем вторинного електроживлення космічної апаратури з високочастотними магнітними ключами», ДР № 0194U021535; ДІ 54-94 «Розробка принципів побудови та дослідження багатоканальних імпульсних джерел живлення з магнітними ключами на основі високочастотних аморфних сплавів з прямокутною петлею гістерезису», ДР № 0194U030622; ДІ 62-91 «Розробка методів та засобів високоякісного енергетичного забезпечення потреб високих та критичних технологій на основі використання нових матеріалів і сучасних інформаційних технологій», ДР 0196U012980; ДФК 113-04 «Розробка багатоканальних імпульсних джерел живлення з покращеними експлуатаційними характеристиками», ДР № 0104U006572; ДІ 12 8-06 «Розробка високоефективних напівпровідникових перетворювачів електроенергії для потреб сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій», ДР № 0106U000127; ДФК 132-06 «Розробка та дослідження високоефективних напівпровідникових перетворювачів електроенергії для потреб високих та критичних технологій», ДР № 0106U007803; COLLABORATIVE LINKAGE GRANT “High-Reliability Switching Power Converters for Security of Information Technology” спільно з лабораторією силової електроніки Каліфорнійського університету, м. Ірвін, США (Директор лабораторії силової електроніки - Prof. K. Smedley) в рамках програми “Nato Programme Security Through Science” (IC S.NUKR.CLG 982639); ДФН 149-08 «Високонадійні імпульсні перетворювачі електроенергії для безпеки інформаційних технологій. CLG 982639», ДР № 0108U005582; ДФК 163-09 «Створення уніфікованого ряду напівпровідникових перетворювачів електроенергії в широкому діапазоні вихідних потужностей», ДР № 0109U2005183; ДФК 181-11 «Високоефективні джерела живлення з коректором коефіцієнта потужності», ДР № 0111U5286; ДІ 189-12 «Методи та математичні моделі високоякісного енергетичного забезпечення захищених комп'ютерних систем», ДР № 0112U002204; ДФК 195-12 «Високоефективні джерела живлення з коректором коефіцієнта потужності», ДР № 0112U005146; ДФК 235-17 «Модульні перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів», ДР № 0112U005146; ДФК 240-18 «Модульні перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів», ДР № 0118U004723.

Науково-дослідні роботи ДФК 113-04, ДФК 132-06, ДФК 163-09, ДФК 181-11, ДФК 195-12, ДФК 235-17, ДФК 240-18 виконувались в рамках реалізації спільних українсько-китайських науково-дослідних проектів за Програмою українсько-китайського науково-технічного співробітництва.

Мета роботи, методи досліджень.

Метою роботи є вдосконалення методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в напівпровідникових перетворювачах на основі високочастотних магнітних підсилювачів.

Об'єктом досліджень є процеси перетворення параметрів електричної енергії в високочастотних напівпровідникових перетворювачах електроенергії.

Предметом досліджень є методи та засоби перетворення електроенергії в напівпровідникових перетворювачах електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів.

Методи досліджень базуються на положеннях теоретико-множинних підходів при побудові енергетичної характеристики, зокрема методів інтервального аналізу, теорії кіл та сигналів при аналізі електромагнітних процесів у високочастотних НПЕ та розробці методів побудови вискоефективних НПЕ на ВМП, теорії автоматичного керування при комп'ютерному моделюванні цих процесів, натурних експериментах для підтвердження теоретичних положень дисертаційної роботи.

Наукова новизна результатів.

Офіційний опонент погоджується з основними положеннями наукової новизни представленої докторської дисертації.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації відповідають меті дисертації та поставленим задачам.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше розроблено метод побудови інтервальної макромоделі енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії для оптимізації масо-габаритних характеристик осердь ВМП, що забезпечило створення технології проектування уніфікованого ряду НПЕ з оптимальними масо-габаритними характеристиками осердь ВМП;

- вперше розроблено метод організації паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на високочастотних магнітних підсилювачах (ІСПН на ВМП), в якому обмотки керованих дроселів насичення одного плеча випрямних діодів всіх ІСПН, ввімкнених на спільне навантаження, розміщені на спільному осерді ВМП, що забезпечує рівномірний розподіл струму навантаження між окремими стабілізаторами;

- вперше запропоновані керовані перетворювачі електроенергії змінної напруги, в яких в ролі силових регулюючих елементів інверторів використано високочастотні магнітні підсилювачі, що дозволило забезпечити змінну вихідну напругу високої якості в широкому діапазоні частоти з покращеними динамічними характеристиками та низьким рівнем електромагнітних завад;

- вперше запропоновано структуру ІСПН на ВМП з синхронним випрямленням, в якому керування польовими транзисторами випрямляча здійснюється безпосередньо у функції напруг високочастотного силового трансформатора інвертора, що забезпечує вищу ефективність, надійність та унеможливує протікання наскрізних струмів у випрямлячі;

- вдосконалено метод управління силовим ключем високочастотного транзисторного інвертора, в якому, на відміну від існуючих, забезпечено перемагнічування дроселя насичення з прямокутною петлею гістерезису в колі додатного зворотного зв'язку за вихідною напругою інвертора в режимі джерела струму з меншими втратами.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

1. Розроблено дослідний зразок стабілізованого НПЕ на ВМП на вихідні параметри 5 В, 50 А, в якому реалізовано метод організації паралельної роботи ІСПН на ВМП, що забезпечує рівномірний розподіл струму навантаження між окремими стабілізаторами в усьому діапазоні його зміни з врахуванням всіх дестабілізуючих факторів при єдиному зворотному зв'язку за вихідною напругою для всіх ІСПН та не потребує врахування технологічного розкиду параметрів осердь ВМП. При цьому забезпечується стабілізація вихідної напруги в діапазоні зміни вхідної напруги - 135-270 В, 50 Гц.

2. Досліджено динамічні характеристики розробленого дослідного зразка НПЕ на ВМП на вихідні параметри 5 В, 50 А, в якому перехідний процес завершується в момент досягнення регульованою величиною (вихідною напругою) її усталеного рівня, що майже на порядок зменшує тривалість перехідного процесу. При цьому час перехідного процесу при включенні перетворювача склав 50 мс.

3. Досліджено рівень електромагнітного випромінювання в дослідному зразку НПЕ на ВМП на вихідні параметри 12 В, 8 А, який в діапазоні частот від 42 МГц до 400 МГц суттєво нижчий, ніж в американського аналога (зокрема, в діапазоні частот 130-200 МГц - в 4-5 разів).

4. Розроблено стабілізований НПЕ на ВМП з синхронним випрямленням на вихідні параметри 24 В, 15 А, в якому керування польовими транзисторами синхронного випрямляча здійснюється безпосередньо у функції напруг ВМП, що унеможливує протікання наскрізних струмів у випрямлячі, та досягнуто максимальний ККД 95,7%.

5. Реалізовано метод побудови вихідного LCD-фільтра в ІСПН на ВМП, в якому керування польовим транзистором, що використовується замість діода, здійснюється у функції напруг дроселів насичення ВМП без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування ним, що забезпечує вищу ефективність та надійність перетворювача.

6. Розроблено алгоритм керування НПЕ на ВМП задля отримання вихідної змінної напруги високої якості в широкому діапазоні зміни її частоти з покращеними динамічними характеристиками та низьким рівнем електромагнітних завад.

7. Розроблена інтервальна макромодель енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії забезпечила створення технології проектування уніфікованого ряду НПЕ з оптимальними масо-габаритними характеристиками осердь ВМП.

8. На основі запропонованих методів розроблено і впроваджено ряд високоефективних промислових зразків НПЕ на ВМП. Зокрема, кероване імпульсне трьохканальне джерело живлення електричних гальм системи електроприводу антени великого діаметра (кожен канал 15 В, 10 А) (ДНТП «ТЕХАС-К», м. Тернопіль), імпульсне джерело живлення автомобільного радіосканера (24 В, 6 А) (ТОВ НВФ «Інтеграл», м. Тернопіль), джерела живлення радіопередавальних та приймальних пристроїв систем дистанційного керування енергооб'єктами та обліку електроенергії (ТОВ ТКБР «Стріла», м. Тернопіль). Матеріали дисертації впроваджені в навчальний процес в ТНТУ ім. І. Пулюя та використані при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт ТНТУ ім. І. Пулюя.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та методи досліджень.

Всі наукові результати та положення, які містяться в дисертаційній роботі, достатньо науково обґрунтовані, а отримані висновки і наведені рекомендації носять практичний характер та достовірні. Обґрунтованість досліджень, сформульованих у дисертаційній роботі висновків і рекомендацій підтверджується виконанням досліджень із застосуванням відомих аналітичних та числових методів, коректними припущеннями та постановкою завдань, збігом теоретичних розробок та результатів комп'ютерного і фізичного моделювання, підтверджується впровадженням розробок, опублікуванням результатів роботи та їх обговоренням на наукових конференціях.

Основний зміст дисертації.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформовано мету і задачі наукового дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, викладено наукову новизну і практичне значення результатів досліджень, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію результатів роботи та публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз стану проблеми побудови високочастотних напівпровідникових перетворювачів електроенергії (НПЕ), обґрунтовано вибір критеріїв при розробці НПЕ, запропоновано альтернативний підхід до реалізації НПЕ з використанням високочастотних магнітних підсилювачів (ВМП), описано принцип його роботи, проведено порівняльний аналіз ВМП з силовими ключами на основі напівпровідникових елементів, зроблено аналіз електромагнітних процесів в імпульсному стабілізаторі на ВМП, розглянуто режими намагнічення магнітного осердя з прямокутною петлею гістерезису (ППГ), приведено характеристики високочастотних магнітних сплавів з ППГ для ВМП. Виявлено потребу у вдосконаленні методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в

напівпровідникових перетворювачах на основі високочастотних магнітних підсилювачів.

У **другому розділі** розглянуто особливості базової структури ІСПН на ВМП. Показано, що вартісні характеристики уніфікованого ряду ІСПН безпосередньо визначаються вартістю осердь ВМП, що вимагає оптимізації їх масо-габаритних характеристик при побудові уніфікованого ряду ІСПН.

Запропоновано та обґрунтовано експериментальний підхід до аналізу масо-габаритних характеристик ВМП як функціональної одиниці ІСПН. Показано, що для реалізації зазначеного підходу з метою мінімізації вартості досліджень доцільно використати методи оптимального планування експерименту і запропоновано схему проведення експериментальних досліджень.

На основі обґрунтованого експериментального підходу вперше створено інтервальну макромодель енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії, яка дає можливість з гарантованою точністю обчислити числовий інтервал для вихідної потужності ВМП для заданих проектних параметрів номінальної вихідної напруги та максимального струму навантаження ІСПН.

Розроблено узагальнений алгоритм оптимізації масо-габаритних характеристик осердь ВМП на основі отриманої інтервальної макромоделі енергетичної характеристики ВМП. Алгоритм реалізовано у вигляді покрокових формалізованих процедур, що забезпечує його використання в технології проектування уніфікованого ряду НПЕ з оптимальними масо-габаритними характеристиками осердь ВМП.

Запропоновано новий метод організації паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на високочастотних магнітних підсилювачах (ІСПН на ВМП), який забезпечує рівномірний розподіл струму навантаження між окремими стабілізаторами в усьому діапазоні його зміни при зміні всіх дестабілізуючих факторів за рахунок використання спільного осердя ВМП в ролі регулюючого елемента для всіх паралельно працюючих ІСПН на ВМП, що унеможливорює вплив технологічного розкиду параметрів осердь ВМП на рівномірність розподілу струму навантаження. Сформульовано умови ввімкнення на паралельну роботу ІСПН на ВМП.

На основі проведеного аналізу методів побудови керованих джерел електроживлення з виходом на змінному струмі встановлено наступні недоліки: низький рівень електромагнітної сумісності, складність процесу формування вихідної змінної напруги, не завжди задовільні динамічні характеристики. З метою їх усунення розроблено метод побудови високодинамічних керованих перетворювачів на основі ВМП з виходом на змінному струмі з високою якістю вихідних напруг та із широким діапазоном регулювання частоти вихідної напруги. Причому для формування як додатної, так і від'ємної півхвилі вихідної змінної напруги в кожному плечі випрямляча використовується спільне осердя ВМП.

У **третьому розділі** розглянуто запропоновані методи побудови ІСПН на ВМП для забезпечення високого рівня струму навантаження та високої ефективності перетворювачів.

Проведено моделювання стабілізатора напруги на основі ВМП. Створено схему керування ВМП в колі зворотного зв'язку за вихідною напругою та структурну схему ІСПН на ВМП в частотній області. Отримана в результаті математичного моделювання функція передачі стабілізатора.

Вперше запропоновано метод побудови ІСПН на ВМП з синхронним випрямленням, в якому керування польовими транзисторами випрямляча здійснюється безпосередньо у функції напруг високочастотного силового трансформатора інвертора без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування ними за рахунок принципу роботи ВМП (на початку кожного півперіоду ВМП перебуває в ненасиченому стані), що забезпечує вищу ефективність, надійність та унеможливує протікання наскрізних струмів у випрямлячі.

У **четвертому розділі** проаналізовано способи симетрування режимів перемагнічування високочастотного силового трансформатора в двотактному перетворювачі, обґрунтовано вибір базового високочастотного транзисторного інвертора для сумісної роботи з регуляторами на ВМП, вдосконалено метод організації паралельної роботи таких інверторів, вдосконалено метод керування силовими ключами за рахунок організації режимів роботи в колах керування з меншими втратами.

Використання дроселя насичення TS з прямокутною петлею гістерезису в колі додатного зворотного зв'язку за вихідною напругою інвертора є визначальним в роботі інвертора. Основні його функції та переваги використання:

- забезпечує автогенераторний режим роботи силових ключів, що суттєво спрощує схемотехніку перетворювача – відпадає необхідність в спеціальній схемі керування, яка, в свою чергу, часто потребує додаткового живлення;

- момент насичення дроселя визначає момент комутації силових ключів автогенератора, що в кінцевому результаті призводить до підвищення рівня вихідної потужності;

- перемагнічування по повній петлі гістерезису та рівність вольтсекундних інтегралів прямокутної петлі гістерезису автоматично призводить до симетрування режимів роботи силового трансформатора, причому в динамічних режимах відпрацювання збурення відбувається за пів періода робочої частоти комутації;

- час перемагнічування дроселя насичення TS визначає час півперіоду робочої частоти комутації;

- забезпечує запуск силового автогенератора з високої частоти;

- унеможливує появу наскрізних струмів в силових ключах;

- при перевантаженні перетворювача з ладу виходить тільки один транзистор;

- підвищує рівень електромагнітної сумісності перетворювача.

Вдосконалено метод організації паралельної роботи високочастотних нерегульованих транзисторних інверторів з високою стабільністю синхронної та синфазної їх комутації в 100% діапазоні зміни всіх збурюючих факторів, Висока стабільність частоти комутації досягнута за рахунок введення єдиного незалежного рівня (для всіх паралельно працюючих інверторів) обмеження швидкості перемагнічування дроселя насичення з прямокутною петлею гістерезису в додатних зворотних зв'язках за вихідними напругами інверторів при перемагнічуванні його в режимі джерела струму.

У **п'ятому розділі** приведено результати експериментальних досліджень електромагнітної сумісності НПЕ на ВМП. Проаналізовано основні міжнародні стандарти, що регламентують рівні електромагнітних завад. Приведено результати досліджень НПЕ на ВМП без та з коректором коефіцієнта потужності (ККП). Запропоновано в НПЕ на ВМП використовувати ККП, в яких реалізована методика, що відома як керування всередині одного тактового циклу або ОСС (One Cycle Control). Зроблено порівняльний аналіз топологій перетворювачів з врахуванням їх електромагнітної сумісності.

Експериментальне дослідження рівня випромінюваних електромагнітних завад НПЕ на ВМП проводилось для створеного в рамках виконання спільного наукового проекту “High-Reliability Switching Power Converters for Security of Information Technology” (IC S.NUKR.CLG 982639) (грант НАТО в рамках програми “Nato Programme Security Through Science”) дослідного зразка перетворювача без коректора коефіцієнта потужності на вихідні параметри 24 В, 8 А в лабораторії силової електроніки Каліфорнійського університету, м.Ірвін, США.

Експериментальне дослідження електромагнітної сумісності НПЕ на ВМП засвідчило низький рівень електромагнітних завад випромінювання. В діапазоні частот від 42 МГц до 400 МГц рівень електромагнітних завад випромінювання розробленого дослідного зразка нижчий, ніж в американського аналога (зокрема, в діапазоні частот 130-200 МГц - в 4-5 разів).

У **шостому розділі** проведено експериментальне дослідження динамічних характеристик НПЕ на ВМП, експериментальне дослідження НПЕ на ВМП з синхронним випрямленням при розірваному зворотному зв'язку за вихідною напругою, експериментальне дослідження стабілізованого НПЕ на ВМП з синхронним випрямленням. Наведені приклади практичної реалізації перетворювачів за даними замовників.

Експериментальні дослідження засвідчили високий рівень динамічних характеристик та відсутність будь-яких перегулювань в перехідних процесах. Перехідний процес завершується в момент досягнення регульованою величиною (вихідною напругою) її усталеного рівня, що майже на порядок зменшує його тривалість. При циклічній 100% зміні навантаження з частотою 5 кГц час перехідного процесу рівний 1,8 мс.

Експериментальне дослідження НПЕ на ВМП з синхронним випрямленням проводилось в два етапи: дослідження при розірваному зворотному зв'язку за вихідною напругою та дослідження стабілізованого НПЕ

на ВМП. Проведене дослідження показує, що сучасні MOSFET з невеликим опором відкритого каналу забезпечують високу ефективність перетворювача. В нашому випадку ефективність перетворювача в діапазоні зміни струму від 3А до 11А (в межах понад 50%) перевищує 94%.

Наведені приклади практичної реалізації керованого трьохканального імпульсного джерела живлення електричних гальм системи електроприводу антени великого діаметра (ДНТП «ТЕХАС-К», м. Тернопіль), імпульсного джерела живлення автомобільного радіосканера (ТОВ НВФ «Інтеграл», м. Тернопіль), джерела живлення радіопередавальних та приймальних пристроїв систем дистанційного керування енергооб'єктами та обліку електроенергії (ТОВ ТКБР «Стріла», м. Тернопіль).

У висновку зазначено, що дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної проблеми – вдосконалення методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в напівпровідникових перетворювачах на основі високочастотних магнітних підсилювачів. Зроблено узагальнення результатів досліджень.

Основні результати роботи й загальні висновки.

В роботі вирішено науково-прикладну проблему вдосконалення методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в напівпровідникових перетворювачах на основі високочастотних магнітних підсилювачів.

1. Розроблено математичний апарат для побудови макромоделі енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії задля оптимізації масо-габаритних та цінкових характеристик магнітопроводів ВМП в широкому діапазоні вихідних потужностей, що забезпечило створення технології проектування уніфікованого ряду НПЕ.

2. Розроблено новий метод організації паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на високочастотних магнітних підсилювачах (ІСПН на ВМП), який забезпечує рівномірний розподіл струму навантаження між окремими стабілізаторами в усьому діапазоні його зміни при зміні всіх дестабілізуючих факторів за рахунок використання спільного осердя ВМП в ролі регулюючого елемента для всіх паралельно працюючих ІСПН на ВМП, що унеможливило вплив технологічного розкиду параметрів осердь ВМП на рівномірність розподілу струму навантаження. Сформульовано умови ввімкнення на паралельну роботу ІСПН на ВМП. Запропонований метод забезпечує рівномірний розподіл струму навантаження при єдиному зворотному зв'язку за вихідною напругою. При цьому схема керування всіма ІСПН на ВМП аналогічна схемі керування одного ІСПН на ВМП.

3. Запропоновано метод організації паралельної роботи високочастотних нерегульованих транзисторних інверторів, в якому, на відміну від існуючих, перемагнічування дроселя насичення з прямокутною петлею гістерезису в режимі джерела струму з обмеженням швидкості його перемагнічування в колах додатних зворотних зв'язків за вихідними напругами

інверторів здійснюється за умови існування єдиного незалежного рівня обмеження швидкості його перемагнічування, що забезпечує вищу стабільність синхронної та синфазної їх комутації в 100% діапазоні зміни всіх збуджуючих факторів. Девіація робочої частоти інверторів менше 1 %.

4. Розроблено метод побудови високодинамічних керованих перетворювачів на основі ВМП з виходом на змінному струмі із широким діапазоном регулювання частоти вихідної напруги. Крім того, такий перетворювач забезпечує низький рівень електромагнітних завад, що особливо важливо для використання його в сонячній енергетиці при віддачі енергії в мережу промислової частоти.

5. Вперше запропоновано та досліджено метод побудови ІСПН на ВМП з синхронним випрямленням, в якому, на відміну від існуючих, керування польовими транзисторами випрямляча здійснюється безпосередньо у функції напруг високочастотного силового трансформатора інвертора без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування ними за рахунок принципу роботи ВМП, що забезпечує вищу ефективність, надійність та унеможливорює протікання наскрізних струмів у випрямлячі. Зокрема, для перетворювача на вихідні параметри 24 В, 15 А при живленні його від джерела постійної напруги 310 В (еквівалент мережі промислової частоти) ефективність його в діапазоні зміни струму навантаження від 3А до 11А знаходиться в межах 94 -95,7 %, що складає більше половини загального діапазону зміни струму навантаження.

6. Вперше запропоновано та досліджено метод реалізації вихідного LCD-фільтра в ІСПН на ВМП, в якому керування польовим транзистором, що використовується замість діода, здійснюється у функції напруг дроселів насичення ВМП без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування ним, що забезпечує вищу ефективність та надійність перетворювача.

7. Удосконалено метод управління силовим ключем високочастотного транзисторного інвертора, який, у порівнянні з існуючими, забезпечив зниження більш як вдвічі втрат в перетворювачі. При цьому на порядок зменшено втрати в колах, що забезпечують режим джерела струму для перемагнічування високочастотного дроселя насичення з прямокутною петлею гістерезису з обмеженням швидкості його перемагнічування в колі додатного зворотного зв'язку за вихідною напругою інвертора, за рахунок введення в коло додаткового понижуючого трансформатора.

9. Проведено математичне та комп'ютерне моделювання запропонованих методів, зокрема розроблено математичну модель регулятора на основі ВМП та проведено його дослідження при замкнутому зворотному зв'язку в частотній області з використанням пакета прикладних програм PSPICE.

10. Експериментальне дослідження електромагнітної сумісності НПЕ на ВМП підтвердило його низький рівень електромагнітних завад випромінювання. Так, в діапазоні частот від 42 МГц до 400 МГц рівень електромагнітних завад випромінювання розробленого дослідного зразка НПЕ на вихідні параметри 24 В, 8 А суттєво нижчий, ніж в американського аналога (зокрема, в діапазоні частот 130-200 МГц - в 4-5 разів).

11. Експериментальні дослідження динамічних характеристик дослідного зразка НПЕ на ВМП на вихідні параметри 5 В, 50 А засвідчили високий рівень динамічних характеристик та відсутність будь-яких перегулювань в перехідних процесах. При цьому час перехідного процесу при його включенні склав 50 мс. Перехідний процес завершується в момент досягнення регульованою величиною (вихідною напругою) її усталеного рівня, що майже на порядок зменшує його тривалість. При циклічній 100% зміні навантаження з частотою 5 кГц час перехідного процесу рівний 1,8 мс.

12. На основі запропонованих методів розроблено і впроваджено ряд високоефективних промислових зразків НПЕ на ВМП. Зокрема, кероване імпульсне трьохканальне джерело живлення електричних гальм системи електроприводу антени великого діаметра (кожен канал 15 В, 10 А) (ДНТП «ТЕХАС-К», м. Тернопіль), імпульсне джерело живлення автомобільного радіосканера (24 В, 6 А) (ТОВ НВФ «Інтеграл», м. Тернопіль), джерела живлення радіопередавальних та приймальних пристроїв систем дистанційного керування енергооб'єктами та обліку електроенергії (ТОВ ТКБР «Стріла», м. Тернопіль). Матеріали дисертації впроваджені в навчальний процес в ТНТУ ім. І. Пулюя та використані при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт ТНТУ ім. І. Пулюя.

Оцінка змісту на оформлення дисертації.

За змістом та оформленням дисертаційна робота й автореферат відповідають встановленим вимогам з атестації кадрів щодо обсягу і структури.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 340 сторінок, у тому числі: 250 сторінок основного тексту, 201 найменування використаних джерел на 28 сторінках, 5 додатків на 32 сторінках. Основний текст дисертації містить 125 ілюстрацій та 11 таблиць по тексту.

Зміст автореферату відображає основні положення дисертації. Автореферат дисертації в необхідній мірі розкриває мету, завдання та отримані в роботі результати, викладений якісною технічною мовою, досить повно і точно відображає основний зміст дисертації і свідчить про достатню професійну підготовку здобувача.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційних досліджень апробовано на 40 міжнародних, 18 національних конференціях та семінарах, а саме на: «Наукоємні технології подвійного призначення» (м. Київ, 1994); Міжнародній НТК, присвяченій 150-річчю від дня народження видатного українського фізика і електротехніка Івана Пулюя (м. Тернопіль, 1995); 2-й (5-й) «Автоматика» (м. Львів, 1995; м. Київ, 1998); the Fourth Ukraine-Russia-China Symposium on Space Science and Technology (Kyiv, 1996); «Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні» (м. Тернопіль, 1998, 2000); the Fifth Sino-Russian-Ukrainian Symposium on Space

Science and Technology held jointly with the First International Forum on Astronautics and Aeronautics (Harbin, China, 2000); International Conference on Modern Problems of Telecommunications, Computer Science and Engineers Training (TCSET'2000, TCSET'2002, TCSET'2004) (Lviv-Slavsko, 2000, 2002; Lviv, 2004); «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (м. Хмельницький, 2000, 2001); the International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (Foros, 2001); Первой (Второй) украинской конференции по перспективным космическим исследованиям (м. Київ, 2001; Кацивелі, 2002); 2001 CIE International Conference on Radar (Beijing, China, 2001); 5-й (6-й, 8-й, 10-й) науковій конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2001, 2002, 2004, 2006); International Conference CADSM 2001 (CADSM 2003, CADSM 2005, CADSM 2013) “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (Lviv, 2001, 2003, 2005, 2013); the 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC'04) (Aachen, Germany, 2004); 26-th International Telecommunication Energy Conference (INTELEC), (Chicago, USA, 2004); «Розвиток ІКТ та інформаційного суспільства: Україна і світовий досвід» (CeBIT-2005, Ганновер, Німеччина); III International Conference on Optoelectronic Information Technologies “PHOTONICS-ODS 2005” (м. Вінниця, 2005); 2-й (III, V, VI) «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи» (м. Тернопіль, 2005, 2008, 2015, 2018); 2-й «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (м. Харків, 2006); «Силовая електроніка та енергоефективність» (СЭЭ'2006, СЭЭ'2008, СЭЭ'2013) (м. Алушта, 2006, 2008, 2013); the VII International Workshop of Electrical Engineering. Lviv Politechnical National University (Lviv, 2006); 5th International Conference-Workshop “Compatibility in Power Electronics” – CPE2007 (Gdansk, Poland, 2007); the V (IX, 13th) “Computational problems of electrical engineering” (Odessa, 2006; Alushta, 2008; Grybow, Poland, 2012); «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвяченій 50-річчю заснування ТНТУ та 165-річчю з дня народження Івана Пулюя (Тернопіль, 2010); «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» (Тернопіль, 2011); «Наука і бізнес - основи розвитку економіки» (Дніпропетровськ, 2012); «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» (Тернопіль, 2013, 2015, 2017); Конференції з питань науково-промислового співробітництва (м. Одеса, 2013); 10th International Conference ELEKTRO 2014 (Rajecke Teplice, Slovak Republic, 2014); «Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу» (м. Київ, 2016); “Advanced Computer Information Technologies” (ACIT 2018, ACIT 2019) (Ceske Budejovice, Czech Republic, 2018, 2019); Конференції, присвяченій 100-річчю Національної академії наук України «Проблеми сучасної електротехніки-2018» (м. Київ, 2018); «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (м. Київ, 2018); «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки,

приладобудування і комп'ютерних технологій» (Тернопіль, 2019); 4th IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2020) (Istanbul, Turkey, 2020).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 39 наукових роботах, у тому числі: 20 статтях - 15 у наукових фахових виданнях України та 5 у закордонних виданнях, що включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS (в т. ч. 1 видання включено до міжнародної наукометричної бази Web of Science), з них 9 статей без співавторів; 8 патентах України на винаходи; 11 у матеріалах міжнародних наукових конференцій, що включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. В роботі викладено авторській підхід до створення нових методів побудови НПЕ на ВМП; забезпечення паралельної роботи ІСПН на ВМП; забезпечення паралельної роботи високочастотних нерегульованих транзисторних інверторів; управління силовим ключем високочастотного транзисторного інвертора; забезпечення синхронного випрямлення та реалізації вихідного LCD-фільтра в ІСПН на ВМП; побудови керованих перетворювачів електроенергії змінної напруги; створення інтервальної макромоделі енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів НПЕ. Внесок автора в роботи, що були опубліковані у співавторстві, конкретизовано у списку публікацій.

У дисертації не використовувались матеріали кандидатської дисертації.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та методи досліджень.

Всі наукові результати та положення, які містяться в дисертаційній роботі, достатньо науково обґрунтовані, а отримані висновки і наведені рекомендації носять практичний характер та достовірні. Обґрунтованість досліджень, сформульованих у дисертаційній роботі висновків і рекомендацій, обумовлюється обраними загально-апробованими методами досліджень: використанням аналітичних процедурних підходів, системного аналізу, методів математичної статистики, теорії надійності, фундаментальних положень теорії кіл, математичного аналізу, методів постановки експерименту. Наукові положення, висновки та рекомендації підтверджуються апробацією на наукових конференціях, а також публікаціями у фахових виданнях.

Враховуючи вище наведене, слід вважати ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій такою, що відповідає вимогам щодо дисертаційних робіт, представленим на отримання наукового ступеня доктора технічних наук.

Зауваження до змісту дисертації та автореферату дисертації.

1. У розділі 2 розроблено узагальнений алгоритм оптимізації масо-габаритних характеристик осердь ВМП на основі отриманої інтервальної макромоделі енергетичної характеристики ВМП. Отримані інтервальні моделі та запропонований метод дають можливість розв'язувати задачі оптимізації широкого ряду перетворювачів на ВМП в діапазоні параметрів $U_{bx}^{min} = 10\text{В}$, $U_{bx}^{max} = 50\text{В}$, $I_n^{min} = 5\text{А}$, $I_n^{max} = 50\text{А}$. Слід пояснити наявність обмежень діапазону параметрів.

2. У підрозділ 3.5 занадто багато уваги приділено опису загально відомих структурних схем та часових діаграм, що пояснюють принцип їхньої дії, методам формування вихідної змінної напруги з використанням методів широтно-імпульсної та комбінованої широтно-частотно-імпульсної модуляції.

3. У підрозділі 3.5.2.1 на функціональній схемі керованого джерела живлення в колах вихідних LCD-фільтрів введені дроселі насичення TS1, TS2 (рис.3.32.), функціональне призначення яких в роботі ніяким чином не описано

4. Підрозділ 5.2 присвячено опису результатів експериментального дослідження електромагнітної сумісності НПЕ на ВМП без коректора коефіцієнта потужності. Наведена функціональна схема (рис.5.5) досліджуваного джерела живлення не відповідає структурній схемі (рис.5.4). Експеримент проводився (очевидно) з використанням високочастотного фільтра та додаткового завадозахисного фільтра, призначення яких не пояснено. Вибір контрольних значень струмів та напруг для проведення експериментів не обґрунтовано.

5. У підрозділі 6.2 наведено функціональну схему перетворювача на основі ВМП із синхронним випрямлячем з розімкненим зворотнім зв'язком за вихідною напругою (рис. 6.10). В дисертації відсутнє обґрунтування критеріїв розрахунку параметрів та вибору обмежувального резистора R1 і потенціометра R2 та їхнього впливу на технічні характеристики перетворювача.

6. У додатку В наведена порівняльна характеристика основних топологій перетворювачів з врахуванням їх електромагнітної сумісності. Не наведений перелік критеріїв, за якими виконується порівняння. Відсутні контрольні значення низки характерних параметрів, що обрані для порівняння топологій на підставі експериментальних досліджень. Наведена таблиця не дозволяє зробити висновок щодо пріоритету окремої топології.

7. В дисертації та авторефераті присутні неточності редакційного характеру. Наприклад: по півмостовій схемі замість напівмостовій (підрозділ 6.2.1); в одних випадках вжито термін «польовий транзистор», в інших MOSFET (розділ 3, розділ 6); при посиланні на рисунки по тексту немає однозначності в написанні - зустрічається скорочена назва «рис.»; на рис. 6.9. Функціональна схема регулятора постійного струму на основі високочастотних магнітних підсилювачів з діодним випрямленням - немає позначень до діодів вихідного випрямляча.

Висновок.

Представлена дисертація Яськіва В.І. «Високоєфективні напівпровідникові перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів» є завершеною науковою працею, в якій вирішено важливу науково-технічну проблему вдосконалення методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в напівпровідникових перетворювачах на основі високочастотних магнітних підсилювачів.

Робота актуальна, має наукову новизну, нові наукові результати і практичне значення. Результати роботи достовірні.

Висловлені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи, а лише підкреслюють її багатогранність, складність, узагальнення результатів виконаних досліджень і не знижують загальної оцінки роботи.

Автореферат відповідає змісту дисертації і розкриває її основні положення.

Враховуючи висловлене, вважаю, що дисертаційна робота «Високоєфективні напівпровідникові перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів» за рівнем отриманих наукових результатів, змістом та обсягом є закінченою науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані теоретичні, експериментальні та практичні результати, що в сукупності вирішують важливу науково-технічну проблему вдосконалення методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в напівпровідникових перетворювачах на основі високочастотних магнітних підсилювачів.

Дисертаційна робота Яськіва В.І. за змістом, одержаними науковими результатами та їх впровадженням на практиці відповідає пп. 9,10,12 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, який затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567 із змінами, внесеними Постановою КМУ № 656 від 19.08.2015 р., та паспорту спеціальності 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії, а її автор Яськів Володимир Іванович цілком заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
директор Інституту іоносфери



Ігор ДОМНІН