

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Яськіва Володимира Івановича
на тему «**Високоєфективні напівпровідникові перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів**»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії
14 – електрична інженерія

Актуальність теми виконаних досліджень її зв'язок з державними науковими програмами.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми вдосконалення методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в напівпровідникових перетворювачах на основі високочастотних магнітних підсилювачів.

Актуальним є вирішення задачі створення загальної концепції побудови високоєфективних компактних високочастотних НПЕ в широкому діапазоні вихідних потужностей (десятки Вт – одиниці кВт) з жорстким набором експлуатаційних характеристик – забезпеченням функціональних параметрів в широкому діапазоні зміни всіх збурюючих факторів, високим рівнем струму навантаження та 100% діапазоном його зміни, високою якістю вихідних напруг, високим ККД, низьким рівнем електромагнітних завад, високим рівнем динамічних характеристик, питомої потужності, надійності, радіаційної та механічної стійкості, низькою собівартістю та високим рівнем їх уніфікації за для мінімізації матеріальних, фінансових та інтелектуальних затрат на етапі як розробки високочастотних НПЕ, так і їх виробництва.

З появою високочастотних магнітних матеріалів з прямокутною петлею гістерезису (ППГ) набуває подальшого розвитку техніка 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.

З огляду на вище сказане, актуальною є науково-прикладна проблема вдосконалення методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в напівпровідникових перетворювачах електроенергії на основі використання високочастотних магнітних підсилювачів.

За тематикою дисертаційної роботи під керівництвом здобувача та його безпосередньої участі було реалізовано 14 науково-дослідних робіт, з яких 7 виконувались в рамках реалізації спільних українсько-китайських науково-дослідних проектів за Програмою українсько-китайського науково-

технічного співробітництва, одна НДР виконувалась в рамках гранту, отриманого за програмою НАТО спільно з лабораторією силової електроніки Каліфорнійського університету, м. Ірвін, США. Ще одна НДР проводилась в рамках виконання Державної космічної програми України за напрямом «Космічне приладобудування» (шифр «Фундамент») - замовник Національне космічне агенство України. Решта НДР проводились на конкурсній основі за замовленням Міністерства освіти і науки України.

Оцінка змісту 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.

У вступі

Обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв'язок роботи з науковою тематикою, сформульовано мету, задачі та методи дослідження, окреслено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача. Подано інформацію про апробацію, публікацію і впровадження результатів дослідження.

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. Сформульовано основні задачі досліджень НПЕ на ВМП.

У другому розділі

Розглянуто особливості базової структури імпульсного стабілізатора на основі високочастотних магнітних підсилювачів (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.

У третьому розділі

Розглянуто запропоновані методи побудови ІСПН на ВМП для забезпечення високого рівня струму навантаження та високої ефективності перетворювачів.

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. 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.

В розділі проведено моделювання стабілізатора напруги на основі ВМП, з врахуванням специфіки схеми керування для малих приростів сигналів (Control Loop Small Signal Modeling).

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 унеможливорює протікання наскрізних струмів у випрямлячі. Для підвищення ефективності, а також забезпечення комплексності системи реалізовано запропонований метод побудови вихідного LCD-фільтра, в якому керування польовим транзистором, що використовується замість діода, здійснюється у функції уже наявних напруг

дроселів насичення ВМП без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування ним (рис. 8).

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 (рис. 9). Причому для формування як додатної, так і від'ємної півхвиль вихідної змінної напруги в кожному плечі випрямляча використовується спільне осердя ВМП. Формування змінної напруги забезпечується на високій робочій частоті вхідного транзисторного інвертора, що в поєднанні з властивостями ВМП забезпечує можливість формування прецизійної вихідної напруги, забезпечує високий рівень динамічних характеристик та електромагнітної сумісності.

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.

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).

Для дослідження НПЕ на ВМП з ККП було реалізовано перетворювач на вихідні параметри 24 В, 10 А. Для керування ККП використано спеціалізовану мікросхему IR1150, в якій реалізована методика ОСС. Перевагою її є забезпечення високого рівня динаміки в коректорі та можливість побудови ККП в діапазоні вихідних потужностей від кількох сотень Вт до кількох кВт.

Нижчий рівень ЕМЗ досліджуваного перетворювача забезпечується використанням в ролі силових регулюючих елементів ВМП, робота яких в ключовому режимі не супроводжується появою високочастотної завади високого рівня та їх властивістю слугувати фільтром кондуктивних ЕМЗ як в насиченому, так і в ненасиченому станах. А високий рівень ефективності та РФС досягається за рахунок оптимального поєднання методів реалізації ККП із запропонованими методами побудови НПЕ на ВМП.

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.

Для експериментального дослідження динамічних характеристик було розроблено дослідний зразок НПЕ на ВМП на вихідні параметра 5 В, 50 А. В цьому перетворювачі реалізовано описаний в розділі 3 метод побудови ІСПН на ВМП з високим рівнем струму навантаження.

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.

В обох випадках нерегульований височастотний транзисторний інвертор реалізований по півмостовій схемі. Дослідження проводились при вхідній напрузі постійного струму $U = 310$ В (еквівалент напруги мережі промислової частоти).

Саме принцип роботи ВМП (затримка появи струму навантаження в силовому колі, обумовлена часом перемагнічування досягнення насичення в робочому півперіоді) унеможливує появу наскрізних струмів при двотактному випрямленні, що дозволило безпосереднє використання синхронних випрямлячів у перетворювачах на основі 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 додатках наведено список публікацій Яськіва В. І. за темою дисертаційного дослідження, протоколи випробувань та акти впровадження результатів дисертації, а також допоміжні матеріали та проміжні результати дослідження.

Наукова новизна роботи

Основні наукові положення, висновки і рекомендації відповідають меті дисертації та поставленим задачам. Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Для створення технології проектування уніфікованого ряду НПЕ вперше розроблено метод оптимізації масо-габаритних характеристик осердь ВМП на основі розробленої інтервальної макромоделі енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії.

2. З метою побудови НПЕ з високим рівнем струму навантаження вперше розроблено метод організації паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на височастотних 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. Це 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 унеможливує вплив

технологічного розкиду параметрів магнітопроводів на рівномірність розподілу струму навантаження.

3. Задля отримання змінної вихідної напруги високої якості в широкому діапазоні зміни її частоти з покращеними динамічними характеристиками та низьким рівнем електромагнітних завад вперше в запропоновано метод побудови керованих перетворювачів, в якому в ролі силових регулюючих елементів інверторів використано високочастотні магнітні підсилювачі.

4. 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, що забезпечує вищу ефективність, надійність та унеможлиблює протікання наскрізних струмів у випрямлячі.

5. Вдосконалено метод організації паралельної роботи високочастотних нерегульованих транзисторних інверторів, в якому, на відміну від існуючих, перемагнічування спільного дроселя насичення в колах додатних зворотних зв'язків за вихідними напругами інверторів здійснюється за умови існування єдиного незалежного рівня обмеження швидкості його перемагнічування при перемагнічуванні його в режимі джерела струму, що забезпечує вищу стабільність синхронної та синфазної їх комутації в 100% діапазоні зміни всіх збурюючих факторів;

6. 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, що дозволило зменшити загальні втрати в інверторі.

Практичне значення отриманих результатів

Вперше проведено дослідження динамічних характеристик НПЕ на ВМП. Встановлено відсутність будь-яких перерегулювань в перехідних процесах - перехідний процес завершується в момент досягнення регульованою величиною (вихідною напругою) її усталеного рівня, що майже на порядок зменшує тривалість перехідного процесу.

Вперше проведено дослідження електромагнітної сумісності НПЕ на ВМП. Експериментально підтверджено нижчий в 4-5 разів рівень електромагнітного випромінювання в дослідному зразку НПЕ на ВМП в порівнянні з американським аналогом тієї ж вихідної потужності.

Експериментальні дослідження запропонованих методів синхронного випрямлення та побудови вихідного LCD-фільтра в ІСПН на ВМП підтвердили їх високу ефективність. Так максимальний ККД в перетворювачі на вихідні параметри 24 В, 15 А при живленні від мережі промислової частоти перевищив 95%.

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.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів підтверджується коректністю основних припущень і положень, покладених в основу наукових досліджень, методами інтервального аналізу, теорії кіл та сигналів при аналізі електромагнітних процесів у високочастотних НПЕ та розробці методів побудови високоефективних НПЕ на ВМП, теорії автоматичного керування при комп'ютерному моделюванні цих процесів, результатами натурних експериментів для підтвердження теоретичних положень дисертаційної роботи.

Повнота викладу результатів в опублікованих працях.

Наукові і практичні 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. Результати дисертаційних досліджень апробовано на 40 міжнародних, 18 національних конференціях та семінарах.

В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні положення дисертаційної роботи, які винесено на захист. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

Автореферат в повній мірі відображає зміст та положення дисертації.

Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень захищеної кандидатської дисертації.

В роботі не використовувались результати досліджень, як і представлено в кандидатській дисертації.

Оформлення дисертації

Оформлення відповідає «Порядку присудження наукових ступенів»,

затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 (пп. 9, 10, 12, 13) та ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення». Стиль викладення відповідає загальноприйнятому і має достатній науковий рівень.

Зауваження по дисертаційній роботі

1. У розділі 1 зроблено аналіз електромагнітних процесів в імпульсному стабілізаторі на ВМП, та розділі 2 наведена базова схема імпульсного регулятора напруги та осцилограми, що пояснюють принцип її роботи вищевказана інформація у рукопису добре відома та зайва.
2. У розділі 3 автор запропонував метод організації паралельної роботи ІСПН який може бути реалізований тільки на етапі проектування конкретного стабілізатора напруги з високим рівнем струму навантаження. Що таке високий рівень струму навантаження?
3. У розділі 3 на рис 3.16 наведена схема керування з ІСПН на ВМП з компенсаційною ланкою але в подальшому розрахунок параметрів ланки надається дуже спрощено.
4. У розділі 3 автор зробив моделювання частотної характеристики регулятора на магнітних підсилювачах за допомогою PSPICE. На думку опонента це застарілий програмний продукт. Автор не вказує якої версії ця програма.
5. У розділі 3 автор отримав результуючу функцію передачі регулятора на основі ВМП із замкнутим зворотнім зв'язком, але не вказує за яким критерієм синтезовано регулятор.
6. У висновках розділу 5 мова ведеться що “використано розроблений метод керування, який забезпечує його закривання при майже нульовому струмі колектора” але ретельного опису метода не наведено є тільки схема.
7. Деякі рисунки виконані у двомовному вигляді, що ускладнює сприйняття (англійська та українська мова або тільки англійська) наприклад рис 2.2.5.17. 5.18 5.21 5.36 та ін.

Висновок.

Дисертація Яськіва В.І. «Високоєфективні напівпровідникові перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів» є завершеною та самостійною науково-дослідною роботою, в якій вирішується важлива науково-прикладна проблема вдосконалення методів та засобів перетворення параметрів електроенергії в напівпровідникових перетворювачах електроенергії на основі використання високочастотних магнітних підсилювачів.

Дисертаційна робота здобувача за своїм рівнем, обсягом і якістю досліджень відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 «Порядку присудження

наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 із змінами, внесеними згідно постанови Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 року № 656, від 30 грудня 2015 року № 1159 та від 27 липня 2016 року № 567, а її автор, Яськів Володимир Іванович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

Офіційний опонент, д. т. н., проф.
завідувач кафедри електроніки,
автоматики, робототехніки та
мехатроніки Національного університету
«Чернігівська політехніка»

Денисов Ю. О.

29.04.2021

Підпис Денисова Ю.О., засвідчую
Вчений секретар Національного університету
«Чернігівська політехніка» д. держ. упр., проф.



І.М. Олійченко