

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Яськів Володимир Іванович



УДК 621.314

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ
ПІДСИЛЮВАЧІВ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії
14 – електрична інженерія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків 2021

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Юрченко Олег Миколайович, завідувач
відділом транзисторних перетворювачів
Інституту електродинаміки НАН України,
м. Київ.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Домнін Ігор Феліксович, директор
Інституту іоносфери НАН та МОН України,
м. Харків;

доктор технічних наук, професор
Павлов Геннадій Вікторович, директор
інституту автоматики та електротехніки
Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова
МОН України, м. Миколаїв;

доктор технічних наук, професор
Денисов Юрій Олександрович, завідувач
кафедри електроніки, автоматики,
робототехніки та мехатроніки
Національного університету «Чернігівська
політехніка» МОН України.

Захист роботи відбудеться 13 травня 2021 року о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий 10 квітня 2021 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради



Володимир ІВАХНО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Функціонування радіоелектронної апаратури є неможливим без відповідного її енергетичного забезпечення. Функції перетворення та погодження параметрів електричної енергії виконують напівпровідникові перетворювачі електроенергії (НПЕ). Понад 90% усіх НПЕ, що виробляються, реалізовані за принципами високочастотного регулювання параметрів електроенергії. На сьогодні ця галузь електротехніки активно розвивається і питома частка НПЕ складає менше 10% від загальних масо-габаритних характеристик систем.

Кожен споживач висуває свій набір вимог до перетворювача, який визначається як специфікою створюваних радіоелектронних систем, так і областю їх застосування. Тому системи електроживлення, як правило, будуються за розподіленою схемою – кожному споживачу – свій перетворювач. Але і в цьому випадку не завжди є можливим реалізувати весь жорсткий набір вимог споживача. В першу чергу це стосується апаратури космічного призначення, яка висуває особливо жорсткі вимоги до радіаційної стійкості та надійності. Крім того, реалізація систем електроживлення за розподіленою схемою призводить до дублювання однакових функціональних вузлів. Масове використання напівпровідникових елементів в ключовому режимі призводить до появи електромагнітних завад, що поширюються як кондуктивно, так і шляхом випромінювання. Рівень споживаної потужності визначає топологію перетворювача, котра в свою чергу вимагає напівпровідникових елементів з відповідними параметрами і методів забезпечення їх роботи, що спричинює низький рівень уніфікації НПЕ і часто ускладнює можливість досягнення високої їх ефективності.

Тому, на часі актуальним є вирішення задачі створення загальної концепції побудови високоефективних 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 задля 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.

Такі переваги НПЕ на ВМП як низький рівень електромагнітних завад, висока якість вихідних напруг, простота схемотехнічних рішень, високий рівень надійності та радіаційної стійкості, ефективності, можливість реалізації багатоканальних джерел живлення з рівноцінними та незалежними вихідними каналами, а також простота реалізації керованих НПЕ у функції будь-яких параметрів чи за заданим алгоритмом, 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.

Визначальною особливістю роботи ВМП є наявність високочастотної вхідної змінної напруги. Саме це, а також некритичність його до форми цієї напруги, робить перспективним використання регуляторів на основі ВМП в сучасних системах безпровідної передачі електроенергії.

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.

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. Перші дослідження в університеті проводились в рамках виконання Державної космічної програми України за напрямом «Космічне приладобудування» (шифр «Фундамент») (1994-1995 рр., замовник - Національне космічне агенство України).

Базовими для підготовки та подання дисертаційної роботи були НДР:

1) ДІ 58-94 – «Розробка систем вторинного електроживлення космічної апаратури з високочастотними магнітними ключами», ДР № 0194U021535;

2) 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;

3) ДІ 62-91 – «Розробка методів та засобів високоякісного енергетичного забезпечення потреб високих та критичних технологій на основі використання нових матеріалів і сучасних інформаційних технологій», 0196U012980;

4) ДФК 113-04 – «Розробка багатоканальних імпульсних джерел живлення з покращеними експлуатаційними характеристиками», ДР № 0104U006572;

5) ДІ 12 8-06 – «Розробка високоефективних напівпровідникових перетворювачів електроенергії для потреб сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій», ДР № 0106U000127;

6) ДФК 132-06 – «Розробка та дослідження високоефективних напівпровідникових перетворювачів електроенергії для потреб високих та критичних технологій», ДР № 0106U007803;

7) 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);

8) ДФН 149-08 – «Високонадійні імпульсні перетворювачі електроенергії для безпеки інформаційних технологій. CLG 982639», ДР № 0108U005582;

9) ДФК 163-09 – «Створення уніфікованого ряду напівпровідникових перетворювачів електроенергії в широкому діапазоні вихідних потужностей», ДР № 0109U2005183;

10) ДФК 181-11 – «Високоефективні джерела живлення з коректором коефіцієнта потужності», ДР № 0111U5286;

11) ДІ 189-12 – «Методи та математичні моделі високоякісного енергетичного забезпечення захищених комп'ютерних систем», ДР № 0112U002204;

12) ДФК 195-12 – «Високоефективні джерела живлення з коректором коефіцієнта потужності», ДР № 0112U005146;

13) ДФК 235-17 – «Модульні перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів», ДР № 0112U005146;

14) 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.

Здобувач здійснював наукове керівництво всіма зазначеними НДР і приймав безпосередню участь у їх виконанні.

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

Для її досягнення необхідно розв'язати такі задачі:

- провести аналіз стану проблеми побудови високоефективних напівпровідникових перетворювачів електроенергії (НПЕ) та обґрунтувати вибір критеріїв при розробці НПЕ;

- розробити математичний апарат для побудови універсальних енергетичних характеристик імпульсних стабілізаторів постійної напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів (ІСПН на ВМП) задля

оптимізації масо-габаритних та цінових характеристик магнітопроводів ВМП уніфікованого ряду НПЕ в широкому діапазоні вихідних потужностей з позиції уніфікації використовуваних методів та елементної бази;

- розробити та обґрунтувати базову структуру НПЕ для побудови уніфікованого ряду НПЕ (розробити методи організації паралельної роботи ІСПН на ВМП, розробити методи організації паралельної роботи високоефективних транзисторних інверторів, призначених для сумісної роботи з ІСПН на ВМП, розробити методи побудови керованих перетворювачів електроенергії на основі ВМП з виходом на змінному струмі);

- розробити та реалізувати методи підвищення ефективності ІСПН на ВМП;

- розробити математичні моделі запропонованих структур НПЕ та провести їх комп'ютерне моделювання;

- провести дослідження електромагнітної сумісності ІСПН на ВМП;

- провести дослідження динамічних характеристик ІСПН на ВМП;

- провести експериментальне дослідження запропонованих методів;

- розробити та впровадити високоефективні промислові зразків НПЕ на основі запропонованих методів.

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 високоефективних НПЕ на ВМП, теорії автоматичного керування при комп'ютерному моделюванні цих процесів, натурних експериментах для підтвердження теоретичних положень дисертаційної роботи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше розроблено метод оптимізації масо-габаритних характеристик осердь ВМП на основі отриманої інтервальної макромоделі енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії, 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 в усьому діапазоні його зміни з врахуванням всіх дестабілізуючих факторів при єдиному зворотному зв'язку за

вихідною напругою для всіх ІСПН та унеможливорює вплив технологічного розкиду параметрів магнітопроводів на рівномірність розподілу струму навантаження;

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

- 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 унеможливорює протікання наскрізних струмів у випрямлячі;

- 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;

- 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 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 унеможливило 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.

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.

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 электроника 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 (Rajecké 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.

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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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.

Спочатку коротко розглянемо теоретичні підстави для побудови інтервальної моделі енергетичної характеристики ВМП.

Модель енергетичної характеристики ВМП подаємо у вигляді лінійної за невідомими коефіцієнтами залежності:

$$E_0(U_{bx}, I_n) = \vec{\phi}^T(U_{bx}, I_n) \cdot \vec{\beta} \quad (1)$$

де E_0 - істинне невідоме значення енергетичної характеристики ВМП, пропорційної вольт-секундній площі протягом насиченого стану його осердя і однозначно визначає енергію, що поступає в навантаження; U_{bx} , I_n - вхідні змінні величини (напруга та струм); $\vec{\phi}^T(U_{bx}, I_n)$ - відомий вектор базисних функцій (поліноміальних); $\vec{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_m)^T$ - невідомий вектор коефіцієнтів залежності.

Варто зазначити, що у цьому випадку, коефіцієнти залежності (1) не мають фізичного змісту, оскільки запропонована математична модель є моделлю типу «чорна скринька».

Зважаючи на те, що визначення коефіцієнтів залежності (1) здійснюємо за результатами експерименту з похибками вимірювань, обмежених за

значеннями (метрологічною похибкою), результати вимірювань подаємо в інтервальному вигляді:

$$U_{bx_i}, I_{n_i}, [E_i^-; E_i^+], E_{0i} \in [E_i^-; E_i^+], i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

де E_i^-, E_i^+ – відповідно, нижня і верхня межі інтервалу вимірюваного значення енергетичної характеристики; N – кількість вимірювань, мінімальне значення яких дорівнює m .

Спираючись на стандартні процедури інтервального аналізу, оцінки $\vec{b} = (b_1, \dots, b_m)^T$ вектора невідомих коефіцієнтів $\vec{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_m)^T$ визначаємо у вигляді множини їх значень

$$\Omega = \left\{ \vec{b} \in R^m \mid \vec{E}^- \leq F \cdot \vec{b} \leq \vec{E}^+ \right\}, \quad (3)$$

де $\vec{E}^- = \{E_i^-, i = 1, \dots, N\}$, $\vec{E}^+ = \{E_i^+, i = 1, \dots, N\}$ – вектори, складені із нижніх та верхніх меж інтервалів $[E_i^-, E_i^+]$, відповідно; $\vec{b}$ – вектор оцінок коефіцієнтів $\vec{\beta}$ моделі; $F = \{\phi_j(U_{bx_i}, I_{n_i}), i = 1, N, j = 1, m\}$ – відома матриця значень базисних функцій, які зазвичай є поліноміальними.

На підставі отриманої множини значень коефіцієнтів (3), обчислюємо множину (коридор) інтервальних моделей енергетичної характеристики у такому вигляді:

$$\left[\hat{E}(U_{bx}, I_n) \right] = \left[\hat{E}^-(U_{bx}, I_n); \hat{E}^+(U_{bx}, I_n) \right], \quad (4)$$

де $\hat{E}^-(U_{bx}, I_n) = \min_{\vec{b} \in \Omega} (\vec{\phi}^T(U_{bx}, I_n) \cdot \vec{b})$ – нижня та $\hat{E}^+(U_{bx}, I_n) = \max_{\vec{b} \in \Omega} (\vec{\phi}^T(U_{bx}, I_n) \cdot \vec{b})$ – верхня межі коридору.

Варто зазначити, що представлення коридору інтервальних моделей у вигляді (4) є незручним для практичних застосувань, зокрема в алгоритмі оптимізації масо-габаритних характеристик осердь ВМП, через «кусову» апроксимацію верхньої та нижньої межі коридору (4). Тому, використовуючи еліпсоїдну апроксимацію області значень коефіцієнтів (3), межі коридору інтервальних моделей енергетичної характеристики набувають такого вигляду:

$$\begin{aligned} \hat{E}^-(U_{bx}, I_n) &= \vec{\phi}^T(U_{bx}, I_n) \cdot \vec{b} - \frac{1}{2} \Delta_{\hat{y}(U_{bx}, I_n, F_m)} \Big|_{\vec{b} \in Q_m}; \\ \hat{E}^+(U_{bx}, I_n) &= \vec{\phi}^T(U_{bx}, I_n) \cdot \vec{b} + \frac{1}{2} \Delta_{\hat{y}(U_{bx}, I_n, F_m)} \Big|_{\vec{b} \in Q_m} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta_{\hat{y}(U_{bx}, I_n, F_m)} \Big|_{\vec{b} \in Q_m} = 2 \sqrt{\vec{\phi}^T(U_{bx}, I_n) \cdot (F_m^T \cdot \delta^{-2} \cdot F_m)^{-1} \cdot \vec{\phi}(U_{bx}, I_n) \cdot m},$$

де $\vec{b} \in Q_m$ - апроксимація еліпсоїдом області Ω значень оцінок коефіцієнтів моделі; $\delta = \text{diag}\{0,5 \cdot (E_1^+ - E_1^-), \dots, 0,5 \cdot (E_i^+ - E_i^-), \dots, 0,5 \cdot (E_m^+ - E_m^-)\}$ - діагональна матриця інтервальних похибок.

Спираючись на вище розглянуті теоретичні підстави у дисертаційній роботі розроблено інтервальну модель енергетичної характеристики високочастотних магнітних підсилювачів ІСПН.

Згідно з апіорним аналізом залежності енергетичної характеристики від вихідних струму та напруги (вихідна напруга приведена до амплітуди напруги ВМП в робочий півперіод) вибрано для її представлення квадратичну модель:

$$\hat{E}(x_1, x_2) = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1^2 + b_4 \cdot x_2^2, \quad (6)$$

Значення приведеної напруги для ряду стабілізаторів постійної напруги знаходились у межах $10 \leq U_{bx} \leq 50$ В, а струму навантаження – $0 \leq I_n \leq 50$ А.

Пронормовані вхідні змінні U_{bx}, I_n :

$$x_1 = 2 \frac{U_{bx} - U_{bx}^{\min}}{U_{bx}^{\max} - U_{bx}^{\min}} - 1, x_2 = 2 \frac{I_n - I_n^{\min}}{I_n^{\max} - I_n^{\min}} - 1 \quad (7)$$

Варто зазначити, що кожен експеримент, який необхідно провести для побудови математичної моделі енергетичної характеристики ВМП, вимагає створення відповідних перетворювачів у вище означених межах вихідних параметрів. Тому, для мінімізації кількості вимірювань, і відповідно кількості необхідних для досліджень перетворювачів, у дисертаційній роботі запропоновано використати методи планування оптимального експерименту. На основі заданої структури моделі у вигляді виразу (6), обираємо з каталогу насичений I_G -оптимальний план. Такий вибір обґрунтовано мінімальною кількістю вимірювань модельованої характеристики ($N=m$) та його властивостями, а саме цей план експерименту апіорі забезпечує максимальну точність моделі. Матриця I_G -оптимального насиченого плану, для нормованих вхідних змінних (7) має такий вигляд

$$X^T = \begin{pmatrix} 1 & -0,227 & -1 & -1 & 0,386 \\ 1 & 1 & 0,227 & -1 & -0,386 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Область експерименту після масштабування задано у вигляді квадрату: $-1 \leq x_1 \leq 1, -1 \leq x_2 \leq 1$.

На основі матриці оптимального плану (8) проведено вимірювання як показано на рис. 1, результати яких наведено у таблиці 1.

Однак, в зв'язку з наявністю похибки вимірювань для побудови інтервальної моделі було сформовано інтервальні значення в точках вимірювань, виходячи з похибки у 10% максимального значення енергетичної характеристики.

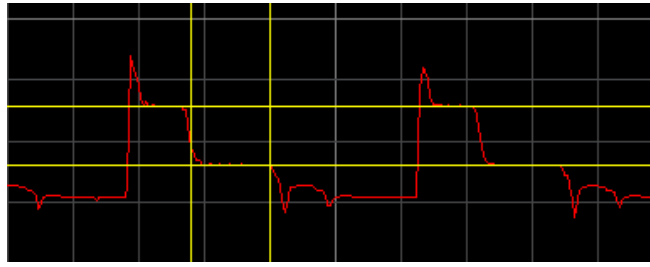


Рисунок 1— Осцилограма напруги на дроселі насичення ВМП для вимірювань в одній з точок визначення значення енергетичної характеристики (площа перетину горизонтальної та вертикальної смуг пропорційна енергії, що поступає в навантаження)

Таблиця 1 - Результати вимірювань в точках насиченого плану

№ вимірювання	x_1	x_2	U_{bx} , В	I_n , А	Е
1	1	1	50	50	277,2
2	-0,227	1	25,46	50	211,16
3	-1	0,227	10	32,61	76
4	-1	-1	10	5	60
5	0,386	-0,386	37,72	18,815	211,05

На основі даних насиченого I_G -оптимального експерименту будуємо інтервальну модель (рис. 2)

$$[E(U_{bx}, I_n)] = -28,052 + 9,976U_{bx} - 0,563I_n - 0,097U_{bx}^2 + 0,03I_n^2 \pm 0,5\Delta_{\hat{E}(U_{bx}, I_n, F)}, \quad (9)$$

де

$$\Delta_{\hat{E}(U_{bx}, I_n, F)} = 2 \cdot (79,649 - 8,644U_{bx} - 4,868I_n - 0,127U_{bx}I_n + 0,624U_{bx}^2 + 0,384I_n^2 + 2,064 \cdot 10^{-3}U_{bx}^2I_n + 1,628 \cdot 10^{-3}U_{bx}I_n^2 - 3,181 \cdot 10^{-5}U_{bx}^2I_n^2 - 0,016U_{bx}^3 - 0,01I_n^3 + 1,39584 \cdot 10^{-4}U_{bx}^4 + 8,715 \cdot 10^{-5}I_n^4)^{1/2}. \quad (10)$$

На основі вище описаного методу побудови енергетичної характеристики ВМП і власне самої побудованої інтервальної моделі розглянемо метод оптимізації масо-габаритних характеристик ВМП. Задача оптимізації цих характеристик є важливою з точки зору проектування перетворювачів електроенергії, оскільки, матеріал, який використовуємо для осердь ВМП є високотехнологічним і відповідно має високу вартість.

Перш за все, для побудови методу, необхідно в додаток до побудованої моделі енергетичної характеристики ВМП, яка представляє коридор залежностей енергетичної характеристики від заданої вхідної напруги та струму навантаження перетворювача, розробити таку ж модель в залежності від

фізичних параметрів ключа. В даному випадку інтервальна модель енергетичної характеристики відображатиме залежність від l - довжини магнітної лінії осердя (мм) та від s - площі перерізу магнітного осердя (мм²).

Як і в попередньому випадку обрано для її представлення квадратичну модель

$$\hat{E}(l, s) = b_0 + b_1 l + b_2 s + b_3 l^2 + b_4 s^2 \quad (11)$$

Межові значення для цих параметрів обрано, виходячи із наявних конструктивних характеристики для ряду осердь $56 \leq l \leq 176$ та $8 \leq s \leq 92$.

Щоб побудувати інтервальну модель енергетичної характеристики у вигляді (11) необхідно провести як мінімум $N=m=5$ вимірювальних експериментів. Як і для попереднього випадку, для мінімізації кількості вимірювань виберемо план насиченого експерименту, який забезпечує мінімізацію максимальної похибки прогнозування моделі, тобто насичений I_G -оптимальний план. Насичений I_G -оптимальний насичений план експерименту обираємо у вигляді матриці (8), попередньо пронормувавши вхідні змінні l та s :

$$\tilde{x}_1 = 2 \frac{l - l^{\min}}{l^{\max} - l^{\min}} - 1, \tilde{x}_2 = 2 \frac{s - s^{\min}}{s^{\max} - s^{\min}} - 1. \quad (12)$$

Тоді модель (11) для нормованих вхідних змінних матиме такий вигляд:

$$\hat{E}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = b_0 + b_1 \cdot \tilde{x}_1 + b_2 \cdot \tilde{x}_2 + b_3 \cdot \tilde{x}_1^2 + b_4 \cdot \tilde{x}_2^2. \quad (13)$$

Результати проведених вимірювань наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 - Результати вимірювань в точках насиченого плану

№ точки	x_1	x_2	l , мм	s , мм ²	E
1	1	1	176	92	277,2
2	-0,227	1	103	92	211,16
3	-1	0,227	56	60	76
4	-1	-1	56	8	60
5	0,386	-0,386	140	34	211,05

Як і у попередньому випадку, через наявну похибку вимірювань для побудови інтервальної моделі було сформовано інтервальні значення в точках вимірювань, виходячи з похибки у 10% максимального значення енергетичної характеристики.

На основі даних насиченого I_G -оптимального експерименту будуємо інтервальну модель для нормованих значень масо-габаритних характеристик:

$$[E(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)] = 191,837 + 83,672\tilde{x}_1 + 24,928\tilde{x}_2 - 38,616\tilde{x}_1^2 + 15,379\tilde{x}_2^2 \pm \frac{1}{2} \Delta_{\hat{E}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, F)}, \quad (14)$$

У формулі (14) $\Delta_{\hat{E}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, F)}$ обчислюємо із такого виразу:

$$\Delta_{\hat{E}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, F)} = 2 \cdot (1610,1 + 232,1\tilde{x}_1 - 232,1\tilde{x}_2 - 667\tilde{x}_1\tilde{x}_2 - 1209,5\tilde{x}_1^2 - 1209\tilde{x}_2^2 + 230\tilde{x}_1^2\tilde{x}_2 - 230\tilde{x}_2^2\tilde{x}_1 - 22\tilde{x}_1^2\tilde{x}_2^2 + 430\tilde{x}_1^3 - 430\tilde{x}_2^3 + 810\tilde{x}_1^4 + 1810\tilde{x}_2^4)^{1/2} \quad (15)$$

Тепер задамо граничні значення для проектованого перетворювача U_{bx}^{max} , I_H^{max} і підставимо ці значення у вираз (9) та (10), що описує коридор інтервальних моделей для енергетичної характеристики в залежності від вхідної напруги та струму навантаження. В результаті обчислень отримаємо $[E(U_{bx}, I_H)]$ - необхідний інтервал для енергії (вольт- секундної характеристики).

Запишемо умову забезпечення масо-габаритних характеристик ключа у такому вигляді

$$\hat{E}(l, s) = b_0 + b_1l + b_2s + b_3l^2 + b_4s^2 \geq [E(U_{bx}, I_H)]. \quad (16)$$

З урахуванням, що модель енергетичної характеристики ключа також є інтервальною, отримаємо

$$[E(l, s)] = 191,837 + 83,672l + 24,928s - 38,616l^2 + 15,379s^2 \pm \frac{1}{2}\Delta_{\hat{E}(l, s, F)} \geq [E(U_{bx}, I_H)] \quad (17)$$

Для знаходження оптимальних масо-габаритних характеристик ключа, перейдемо від нерівності до рівняння у виразі (17):

$$[E(l, s)] = 191,837 + 83,672l + 24,928s - 38,616l^2 + 15,379s^2 \pm \frac{1}{2}\Delta_{\hat{E}(l, s, F)} = [E(U_{bx}, I_H)], \quad (18)$$

де $\frac{1}{2}\Delta_{\hat{E}(l, s, F)}$ - задано виразом (15)

Таким чином, розв'язки цього трансцендентного рівняння і забезпечують знаходження оптимальних масо-габаритних характеристик ВМП.

Проілюструємо на графічному прикладі виконання вищезазначеної обчислювальної процедури. Нехай, необхідно визначити оптимальні масо-габаритні характеристики ВМП з параметрами: $U_{bx}^{max}=45\text{В}$, $I_H^{max}=40\text{А}$. Зазначені параметри перетворювача підставляємо у вираз (9) та (10), отримуємо інтервал $[E(U_{bx}, I_H)] = [246; 248]$. На рис. 2 проілюстровано виконання цих обчислень.

Тепер отриманий інтервал $[E(U_{bx}, I_H)] = [246; 248]$ підставляємо в трансцендентне рівняння, з якого отримаємо множину розв'язків цього рівняння, як це проілюстровано на рис. 3. Як бачимо з рисунка, розв'язки рівняння відображені на площині, що задає масо-габаритні характеристики ВМП.

Отримані інтервальні моделі та запропонований метод дають можливість розв'язувати задачі оптимізації широкого ряду перетворювачів на ВМП в діапазоні параметрів $U_{bx}^{min} = 10\text{В}$, $U_{bx}^{max}=50\text{В}$, $I_H^{min}=5\text{А}$, $I_H^{max}=50\text{А}$.

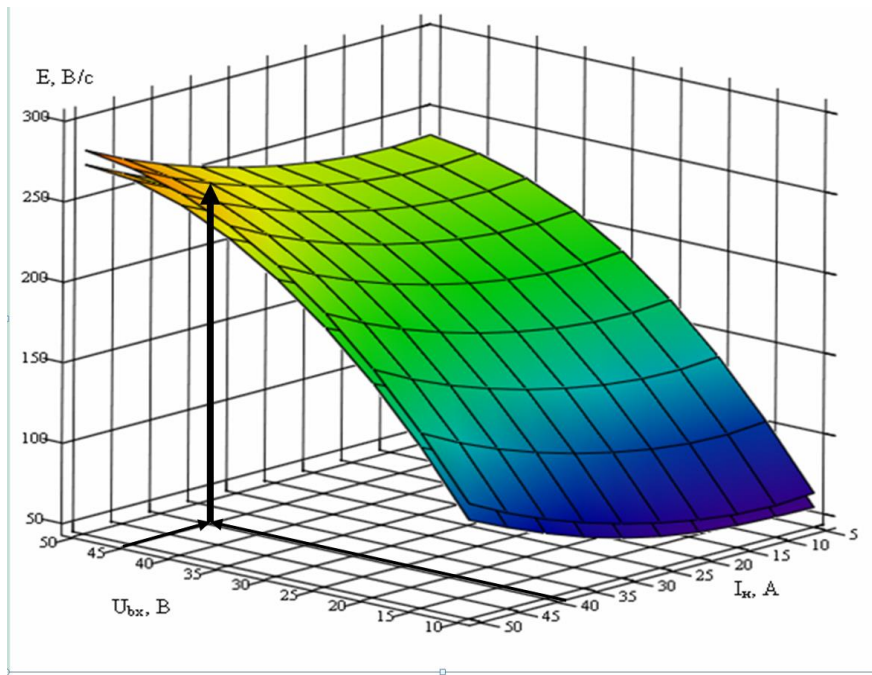


Рисунок 2 – Ілюстрація розрахунку інтервалу значень енергетичної характеристики для заданих параметрів перетворювача. U_{bx}^{max} , I_n^{max}

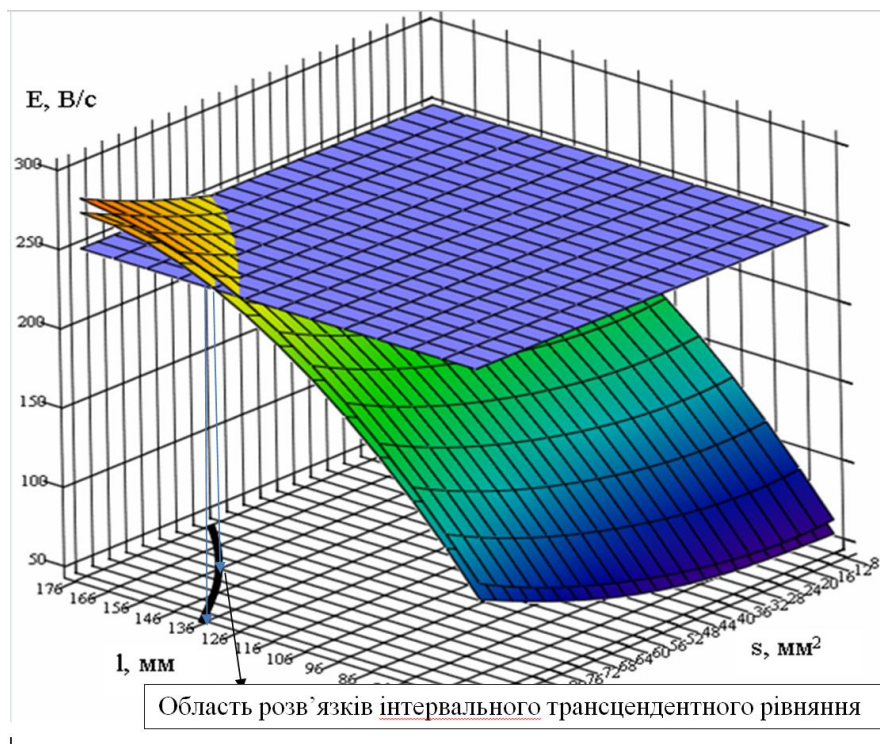


Рисунок 3 – Ілюстрація отримання розв'язків трансцендентного інтервального рівняння

У третьому розділі розглянуто запропоновані методи побудови ІСПН на ВМП для забезпечення високого рівня струму навантаження та високої ефективності перетворювачів. Вони базуються на наступних положеннях:

- відсутність будь-яких додаткових зворотних зв'язків, схем керування, демпфуючих ланок чи інших елементів в схемотехніці;
- максимальне використання уже наявних елементів в перетворювачі;
- максимальне використання уже наявних сигналів в перетворювачі від елементів, які визначають принцип його роботи;
- забезпечення максимально можливої ефективності перетворювача;
- забезпечення функціонування в 100% діапазоні зміни струму навантаження;
- мінімальні затрати на досягнення поставленої мети.

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 (рис. 4).

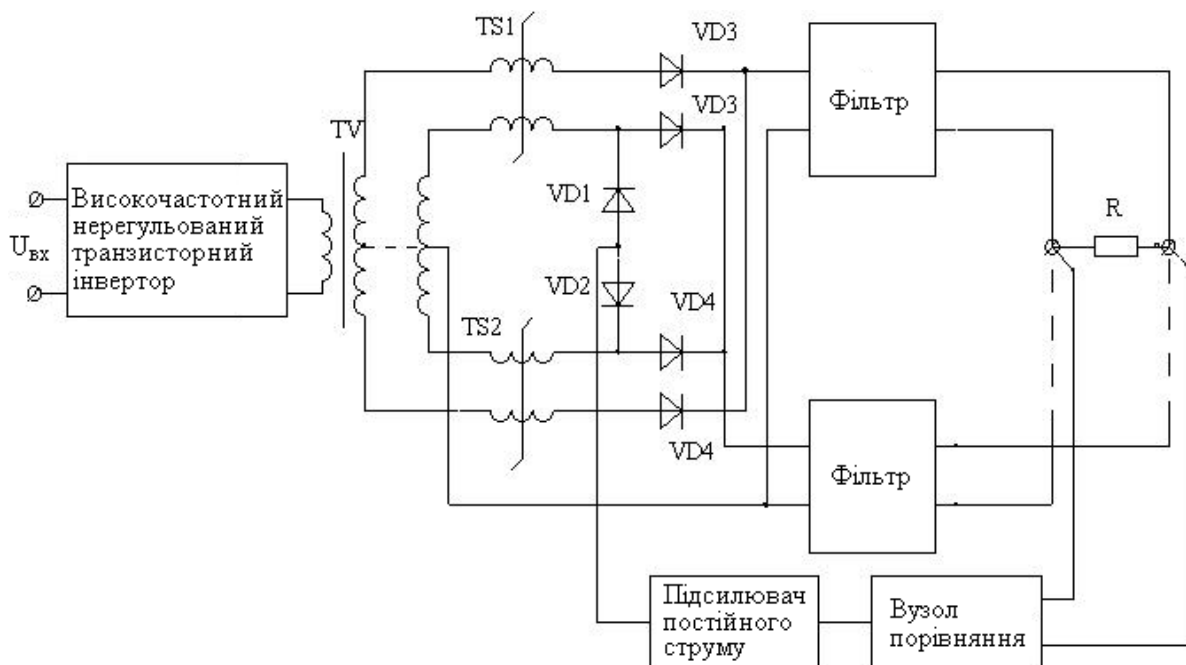


Рисунок 4 – Функціональна схема організації паралельної роботи ІСПН на ВМП

Переваги:

- використання одного типорозміру осердя магнітопроводу ВМП в одному плечі ІСПН на ВМП унеможливорює вплив технологічного розкиду параметрів магнітопроводів на рівномірність розподілу струму навантаження між окремими паралельно ввімкненими ІСПН;
- підвищення стабільності вихідної постійної напруги за рахунок спрощення системи її регулювання - зменшення кількості силових регулюючих елементів та спрощення схеми керування (відсутнє дублювання будь-яких функціональних вузлів чи елементів, схема керування повністю аналогічна схемі керування для одного ІСПН);
- підвищення якості вихідної напруги за рахунок роботи силового ключа (ВМП) на єдиному куті керування для всіх ІСПН;
- підвищення ККД стабілізатора в цілому;
- високий рівень динамічних характеристик;
- оптимізація використання дроселів вихідних фільтрів за масо-габаритними та енергетичними показниками;
- зменшення собівартості в порівнянні з аналогами;
- можливість використання запропонованого методу для побудови високоефективних та надійних ІСПН на ВМП на рівні вихідних струмів десятки-сотні ампер в широкому діапазоні зміни всіх збурюючі факторів.

В розділі проведено моделювання стабілізатора напруги на основі ВМП, функціональна схема якого представлена на рис. 5. На рис. 6 представлено схему керування ВМП в колі зворотного зв'язку за вихідною напругою та структурну схему ІСПН на ВМП в частотній області. Моделювання проводилось для стабілізатора напруги на основі ВМП з врахуванням специфіки схеми керування для малих приростів сигналів (Control Loop Small Signal Modeling).

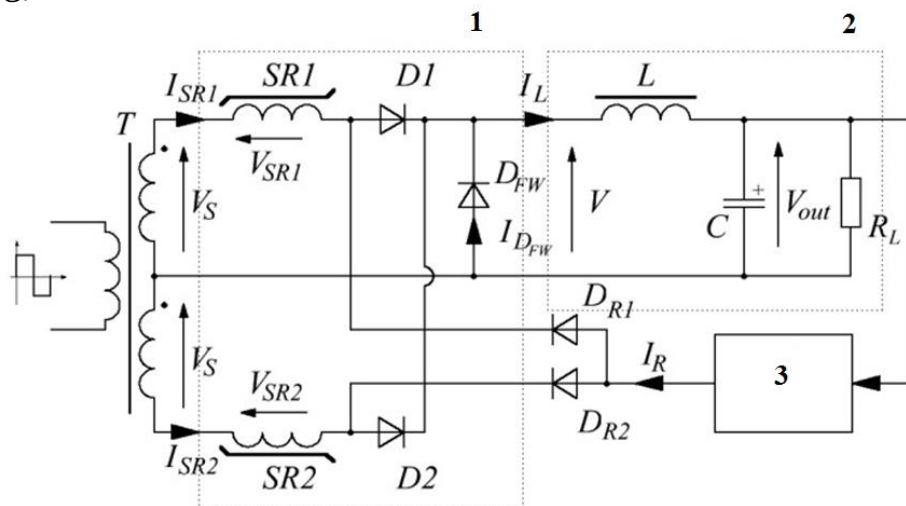


Рисунок 5 – Функціональна схема ІСПН на ВМП: 1- ВМП та випрямляч; 2 – вихідний фільтр та навантаження; 3 – схема керування

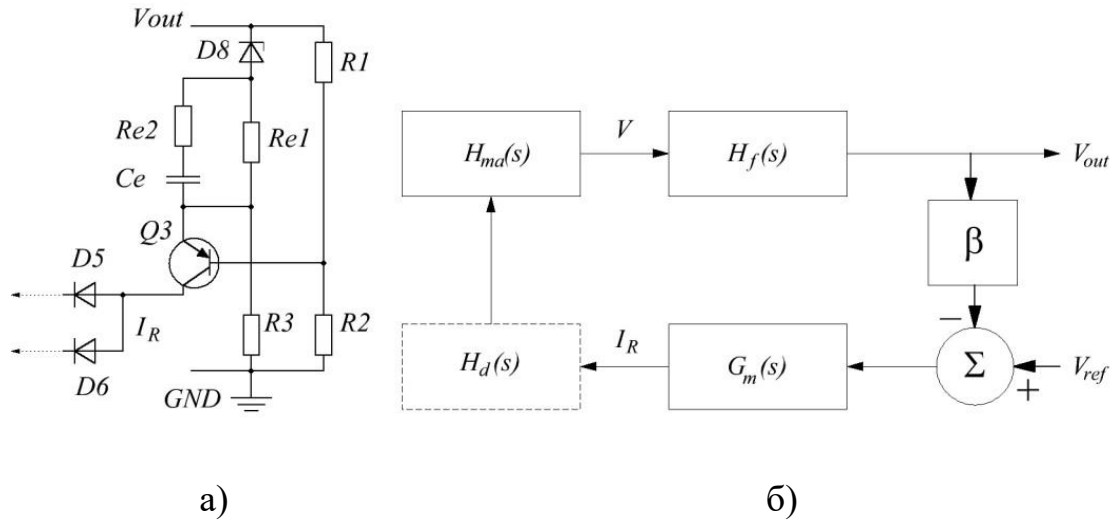


Рисунок 6 – Схема керування ІСПН на ВМПі а) та структурна схема ІСПН на ВМПі в частотній області б)

Отримана в результаті математичного моделювання функція передачі стабілізатора

$$\begin{aligned}
 G_L(s) &= \beta G_m(s) H_{ma}(s) H_d(s) H_f(s) = \\
 &= \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(-\frac{1}{R_E} \right) \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{\omega_p}} \right) (-2f_s L_{SR}) \left(\frac{1 - \frac{s}{4f_s}}{1 + \frac{s}{4f_s}} \right) \frac{1}{1 + \frac{1}{Q} \left(\frac{s}{\omega_n} \right) + \left(\frac{s}{\omega_n} \right)^2} \quad (19)
 \end{aligned}$$

Частотна характеристика регулятора на магнітних підсилювачах була змодельована за допомогою PSPICE програмного забезпечення (рис. 7). З графіків видно, що відставання фази спостерігається на частоті вище 1 кГц. Частота зрізу вихідного фільтра становить близько 100 Гц. Ланка компенсації з частотою зрізу 300Hz призначена для стабілізації системи. Скоректовані частотні характеристики регулятора на основі ВМПі представлені на рис. 8. Результати моделювання дали стабільну систему з перехідною частотою 730 Гц і запасом по фазі 45 градусів.

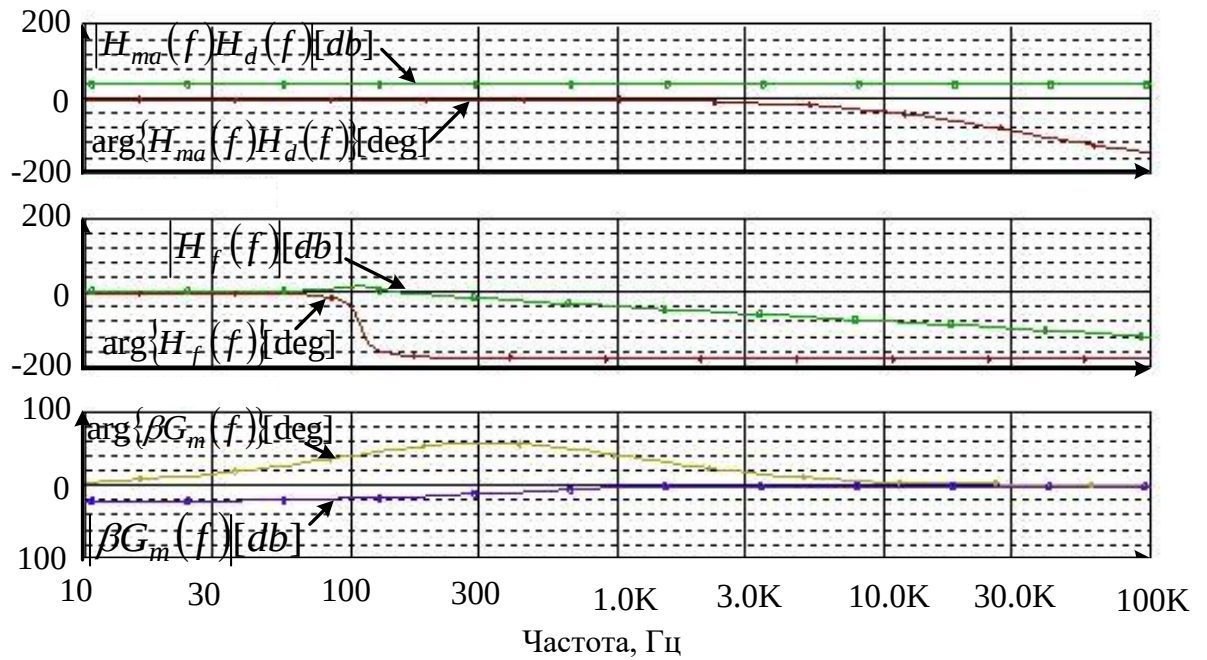


Рисунок 7 – Результати моделювання: частотні характеристики ІСПН на ВМП. Зверху: частотна характеристика магнітного підсилювача, включаючи затримку $H_{ma}(f)H_d(f)$; по середині: частотна характеристика вихідного фільтра $H_f(f)$; знизу: частотна характеристика кола керування $\beta G_m(f)$

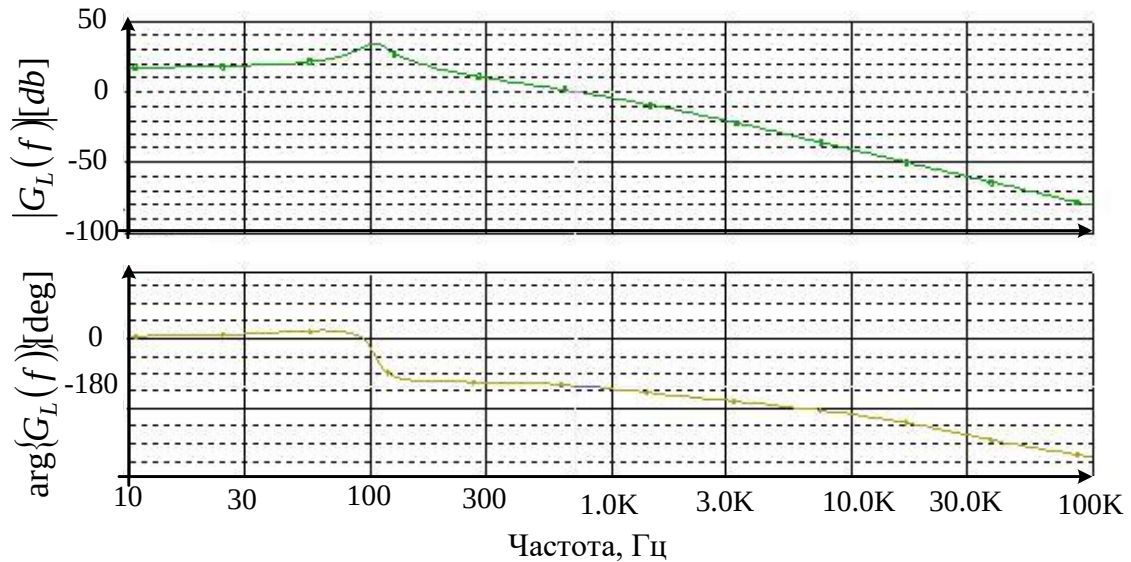


Рисунок 8 – Скоректовані частотні характеристики регулятора на основі ВМП $G_L(f)$. Зверху: АЧХ; знизу: ФЧХ

Вперше запропоновано метод побудови ІСПН на ВМП з синхронним випрямленням, в якому керування польовими транзисторами випрямляча здійснюється безпосередньо у функції напруг височастотного 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 VT3, що використовується замість діода, здійснюється у функції уже наявних напруг дроселів насичення ВМП через обмотки W7 та W8 без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування ним (рис. 9).

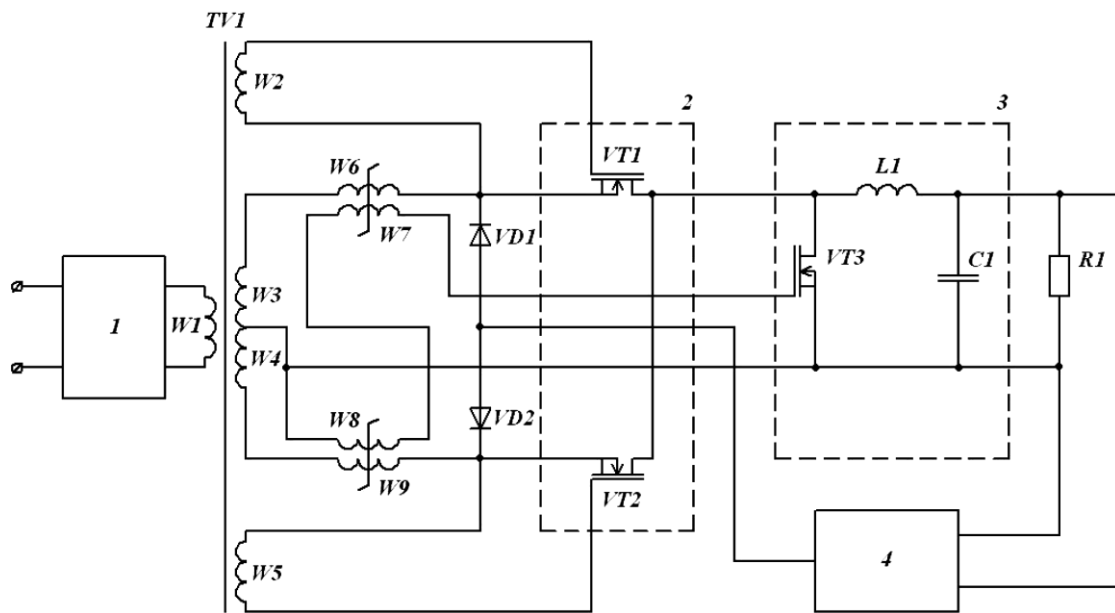


Рисунок 9 – Функціональна схема ІСПН на ВМП з синхронним випрямленням та польовим транзистором у вихідному фільтрі, що керується у функції напруг дроселів насичення ВМП

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 (рис. 10). 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 входного транзисторного інвертора 1, що в поєднанні з властивостями ВМП забезпечує можливість формування прецизійної вихідної напруги, забезпечує високий рівень динамічних характеристик та електромагнітної сумісності. Ключі на основі транзисторів VT1 і VT2 дозволяють здійснювати частотне регулювання вихідної напруги.

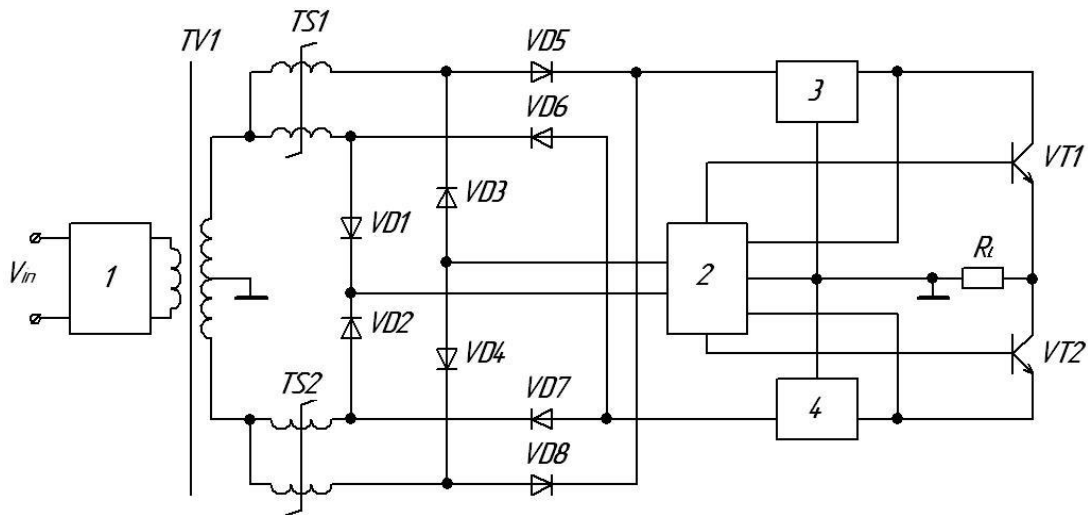


Рисунок 10 – Функціональна схема керованого перетворювача на основі ВМП з виходом на змінному струмі (1 – високочастотний транзисторний інвертор; 2 – схема керування; 3, 4 – вихідні фільтри)

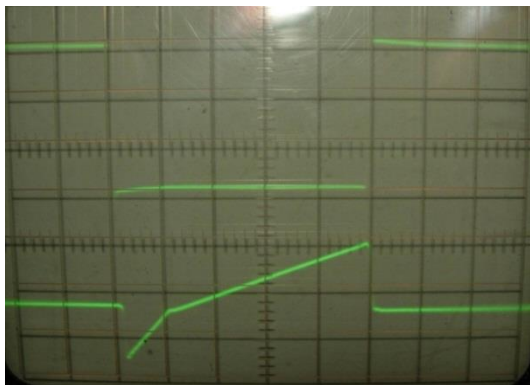
У четвертому розділі проаналізовано способи симетрування режимів перемагнічування високочастотного силового трансформатора в двотактному перетворювачі, обґрунтовано вибір базового високочастотного транзисторного інвертора для сумісної роботи з регуляторами на ВМП, вдосконалено метод організації паралельної 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:

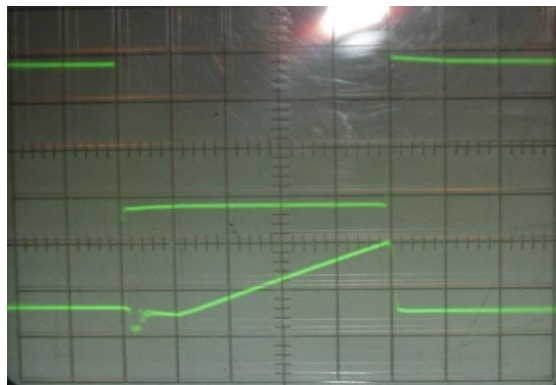
- забезпечує автогенераторний режим роботи силових ключів, що суттєво спрощує схемотехніку перетворювача – відпадає необхідність в спеціальній схемі керування, яка, в свою чергу, часто потребує додаткового живлення;
- момент насичення дроселя визначає момент комутації силових ключів автогенератора, що 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;
- унеможливорює появу наскрізних струмів в силових ключах;
- при перевантаженні перетворювача з ладу виходить тільки один транзистор;

- підвищує рівень електромагнітної сумісності перетворювача.

Осцилограми, що ілюструють роботу такого інвертора, представлені на рис. 11 та 12.

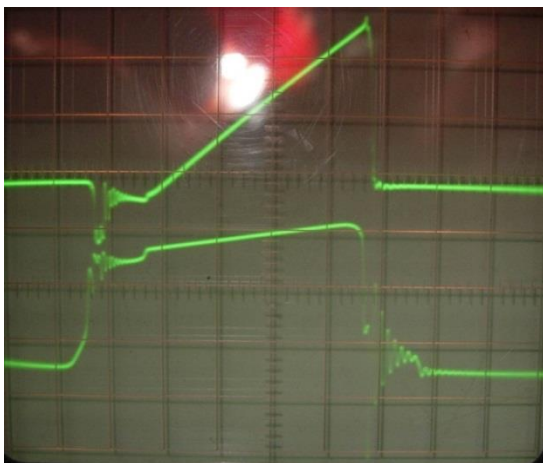


а)

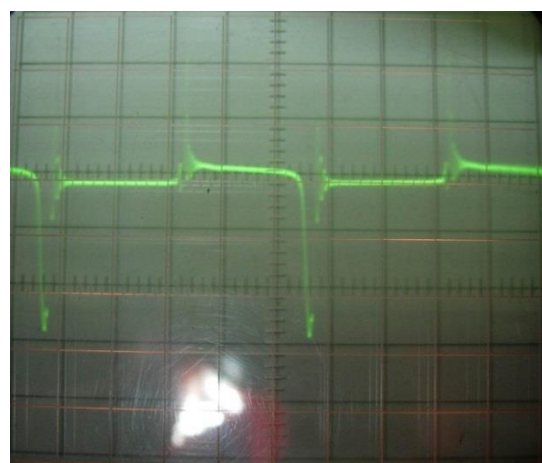


б)

Рисунок 11 – Осцилограми напруги колектор-емітер $U_{ке}$ (верхня осцилограма) та струму колектора $I_{к}$ (нижня осцилограма): а) з урахуванням струму шунтового діода; б) без урахування струму шунтового діода



а)



б)

Рисунок 12 – Осцилограми: а) струму колектора $I_{к}$ та базової напруги $U_{бє}$; б) струму бази $I_{б}$

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 OCC (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. Результати наведено на рис. 13.

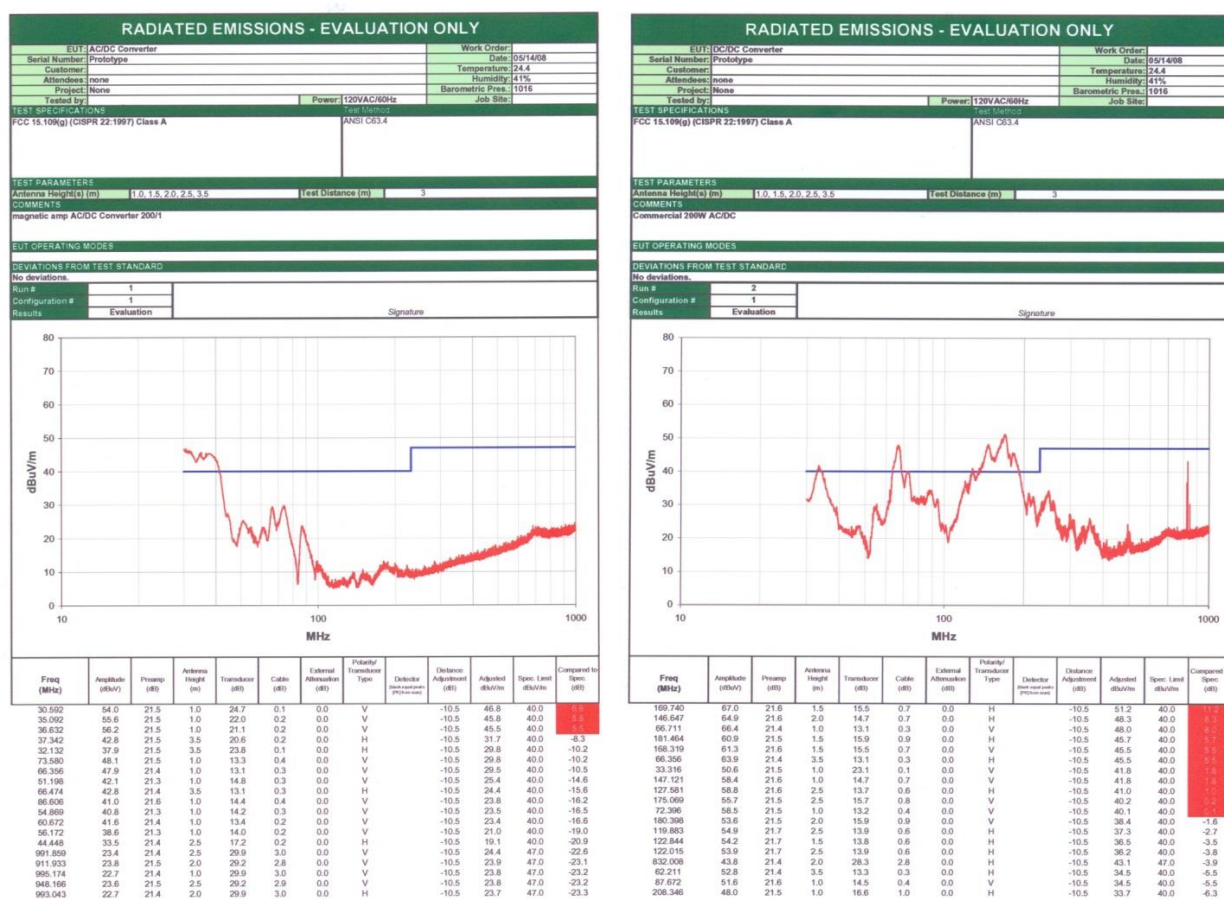


Рисунок 13 – Результати вимірювань рівнів випромінюваних електромагнітних завад дослідного зразка НПЕ на ВМП (зліва) та аналога (США) тієї ж вихідної потужності (справа)

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. Осцилограми вхідної напруги і споживаного від мережі струму представлено на рис. 14. На рис. 15 приведено залежності коефіцієнта потужності та коефіцієнта корисної дії при різних значеннях вхідної напруги у функції вихідної потужності.

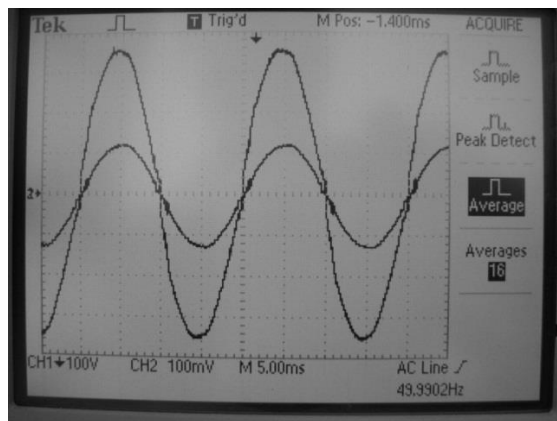


Рисунок 14 – Осцилограми вхідної напруги і споживаного від мережі струму: при $P_{\text{вих}}=240$ Вт: Ch1 – напруга мережі $U=90$ В; Ch2: - струм мережі (1.33А/под)

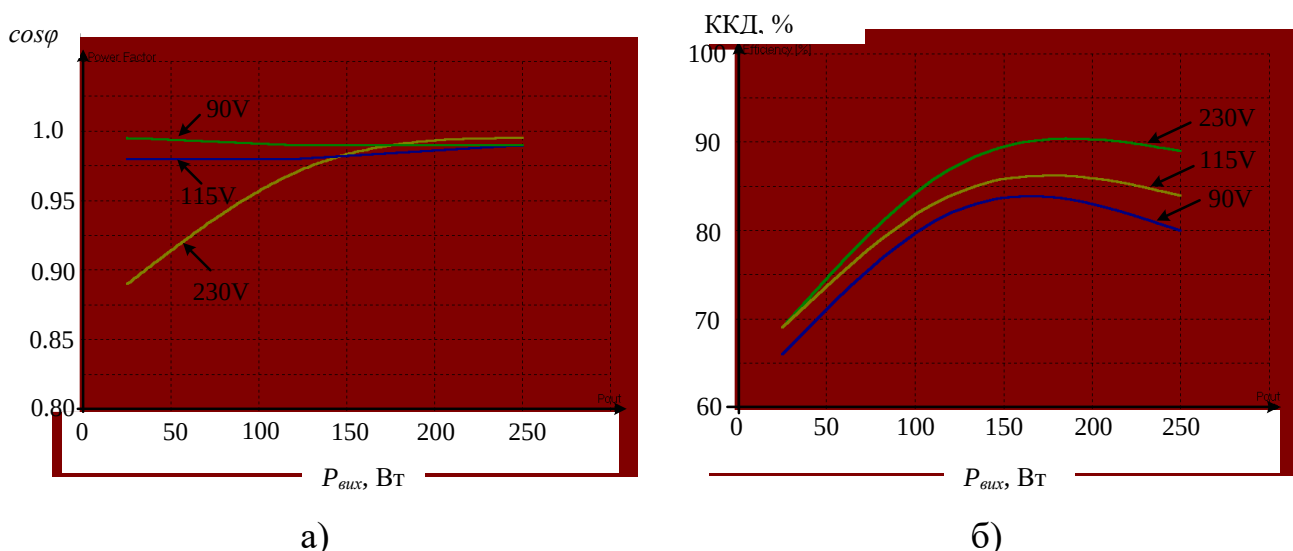


Рисунок 15 – Коефіцієнт потужності а) та коефіцієнт корисної дії б) як функції вихідної потужності та вхідної змінної напруги

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 $\cos\phi$ 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. Для аналізу динаміки розробленого джерела живлення функціональна схема стабілізатора напруги на ВМП (рисунок 4) в частотній області може бути подана структурною схемою (рис. 16), де K - коефіцієнт підсилення схеми керування, $W_{TS}(p)$ – передавальна функція ВМП, $W_{\phi}(p)$ - передавальна функція вихідного фільтра, β - коефіцієнт подільника вихідної напруги.

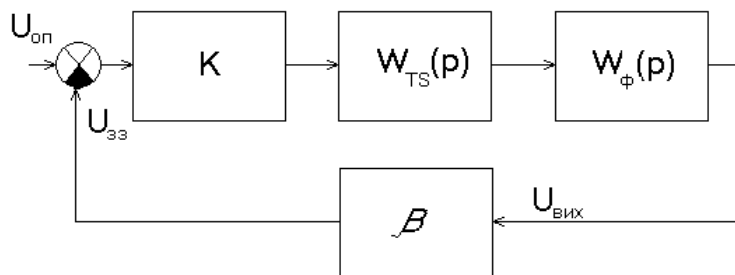


Рисунок 16 – Структурна схема досліджуваного джерела живлення в частотній області

Передавальна функція дроселя насичення (в т.ч. для ВМП) може бути подана як

$$W_{TS} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta I_y}, \quad (20)$$

де ΔI_y – приріст струму керування; $\Delta U_{вих}$ – відповідний приріст вихідної напруги магнітного підсилювача (напруга на навантаженні).

Відношення приросту вихідної напруги магнітного підсилювача до відповідного приросту струму керування є його передавальним опором K_R , який через основні параметри магнітного підсилювача виражається наступним чином

$$K_R = \frac{2fW^2S \times \Delta B_y}{\Delta H_y l} = 2fW^2 \frac{S}{l} \mu_0 \mu_d, \quad (21)$$

де f - частота змінної вхідної напруги; W - кількість витків обмотки; S - активна площа перерізу магнітопроводу; l - середня довжина магнітної лінії; μ_0 - абсолютна магнітна проникність; μ_d - динамічна магнітна проникність (за динамічною кривою розмагнічення); ΔH_y - приріст напруженості зовнішнього поля в півперіод керування; ΔB_y - відповідний приріст індукції.

В інший спосіб через параметри магнітного підсилювача K_R виражається наступним чином

$$K_R = \frac{U_1 W^2}{H_m l} = r_B W^2, \quad (22)$$

де H_m - напруженість поля повного перемагнічування на заданій частоті; U_1 - приведені значення напруги насичення на один виток; r_B - еквівалентний опір перемагнічування на один виток.

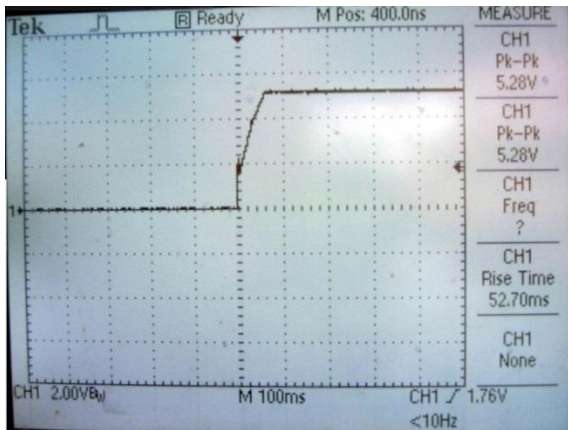
Оскільки зміна вихідної напруги ВМП є функцією струму керування в попередній півперіод керування, то його можна розглядати як ланку із запізненням. Час запізнення рівний півперіоду частоти напруги живлення (напруга височастотного силового трансформатора). Передавальна функція ВМП з урахуванням часу запізнення має вигляд

$$W_{TS}(p) = K_R \exp(-pT/2). \quad (23)$$

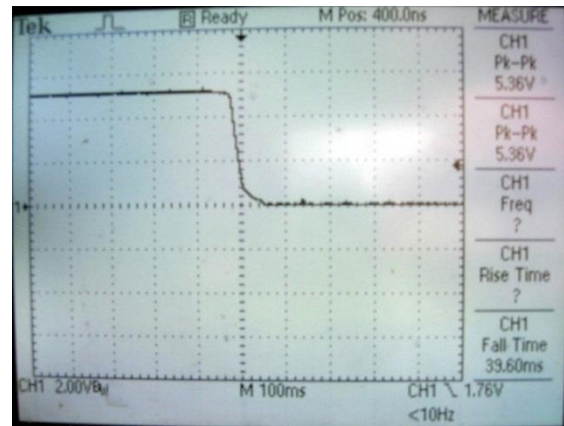
Таким чином, отримуємо функцію передачі для ВМП у вигляді безінерційного елемента із запізненням на пів періода робочої частоти комутації, що визначає високий рівень динаміки НПЕ на ВМП. Якість перехідних процесів в перетворювачах на ВМП забезпечується фізикою процесів перемагнічування в ньому, зокрема здатністю запам'ятовувати магнітний стан при зміні напрямку дії зовнішнього поля, а також властивістю інтегрально визначати цей магнітний стан при дії сумарного зовнішнього поля.

На рис. 17а наведено процес зміни вихідної напруги при ввімкненні джерела живлення в первинну мережу. Рис. 17б ілюструє процес зміни вихідної напруги при вимкненні джерела живлення. Тривалість перехідних процесів знаходиться на рівні 50мс.

Експериментальні дослідження засвідчили високий рівень динамічних характеристик та відсутність будь-яких регулювань 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.



а)



б)

Рисунок 17 – Перехідні процеси вихідної напруги в джерелі живлення:
а) при його включенні; б) при виключенні

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 високочастотний транзисторний інвертор реалізований по півмостовій схемі з використанням польових транзисторів K2730, керування яких забезпечувалось драйвером IR2110. Дослідження проводились при входній напрузі постійного струму $U = 310$ В (еквівалент напруги мережі промислової частоти).

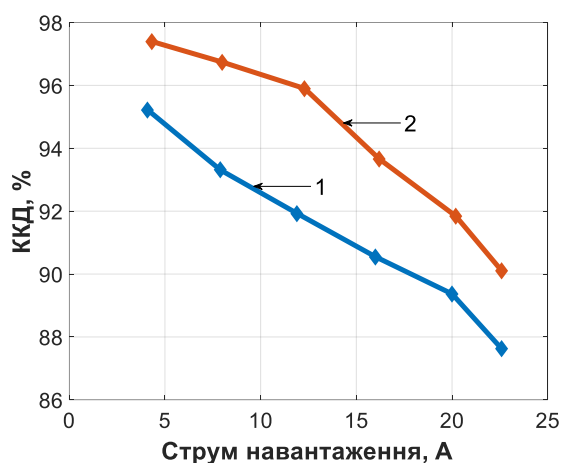
Для дослідження НПЕ при розірваному зворотному зв'язку за вихідною напругою у вихідному випрямлячі використовувались діоди MBR2080 та польові транзистори IRL3705 (опір каналу у відкритому стані 10 мОм). Залежності ККД наведені на рис. 18а. Осцилограми, приведені на рис. 18б, підтверджують роботу польового транзистора, що керується у функції напруг ВМП, у вихідному фільтрі перетворювача (рис. 9). Причому його робота забезпечується у всьому діапазоні зміни струму навантаження.

При дослідженні стабілізованого перетворювача на вихідні параметри 24 В, 15 А у вихідному випрямлячі використовувались діоди MBR30100 та польові транзистори IRFB4310 (опір каналу у відкритому стані 5,6 мОм). Залежності ККД наведені на рис. 19а. Осцилограми зміни dB/dt в дроселі насичення ВМП та пульсацій вихідної напруги приведені на рис. 19б.

Саме принцип роботи ВМП (затримка появи струму навантаження в силовому колі, обумовлена часом перемагнічування досягнення насичення в робочому півперіоді) унеможливорює 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%.

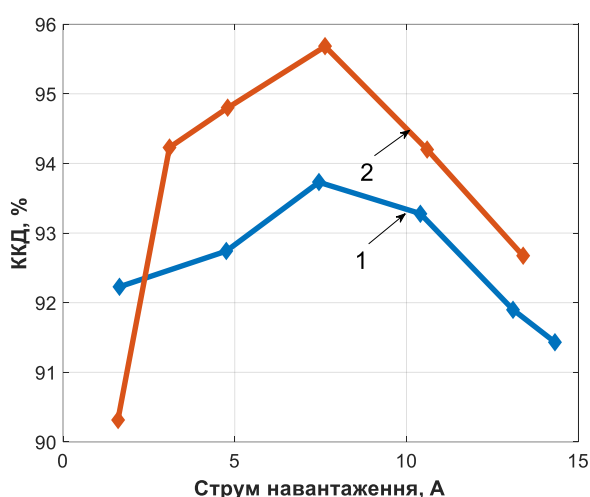


а)

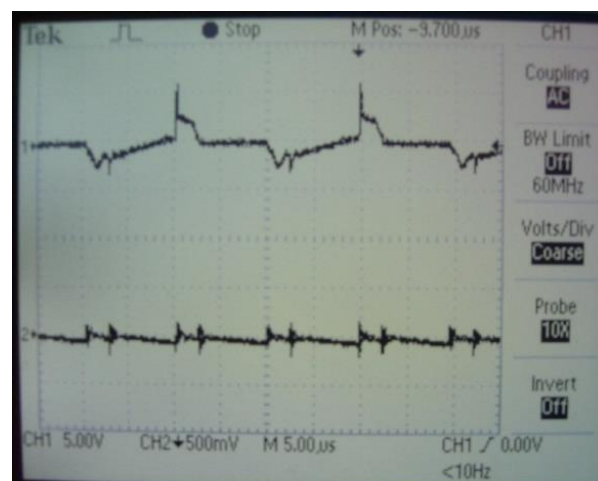


б)

Рисунок 18 – а) ККД перетворювача: 1 - з діодним випрямленням, 2 – з синхронним випрямленням ; б) осцилограми dB/dt в дроселях насичення ВМП та струму через MOSFET у вихідному фільтрі при струмі навантаження $I = 12$ А



а)



б)

Рисунок 19 – а) ККД стабілізованого НПЕ на ВМП: 1 - з випрямними діодами, 2 - з синхронним випрямлячем; б) осцилограми dB/dt в дроселі насичення ВМП (верхня осцилограма) і пульсації вихідної напруги (нижня осцилограма) при струмі навантаження $I = 10$ А

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).

ВИСНОВКИ

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

1. Проведено аналіз за проблемою побудови високоефективних напівпровідникових перетворювачів електроенергії та створення їх уніфікованого ряду. Обґрунтовано вибір критеріїв при розробці НПЕ.

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

3. 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 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.

4. 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 збурюючих факторів. Девіація робочої частоти інверторів менше 1 %.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях України та наукових періодичних виданнях інших держав, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Яськів В. І. Забезпечення синхронної та синфазної роботи високочастотних транзисторних інверторів / **В. І. Яськів**, О. П. Гурник // Вісник Нац. Ун-ту «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів, 2002. — № 443. — С. 100–104.

Здобувачем розроблено метод забезпечення синхронної та синфазної роботи високочастотних транзисторних інверторів.

2. Яськів В. І. Нові методи проектування імпульсних джерел вторинного електроживлення засобів комп'ютерної техніки / **В. І. Яськів** // Теоретична електротехніка : зб. наук. пр. — Львів : Львівський нац. ун-т ім. Івана Франка, 2002. — № 56. — С. 135–141.

3. Яськів В. І. Математична модель імпульсного стабілізатора напруги на магнітних ключах / **В. І. Яськів** // Технічна електродинаміка. — Київ, 2002. — № 6. — С. 20–22.

4. Яськів В. И. Использование высокочастотных магнитных усилителей в источниках питания аппаратуры космического назначения / **В. И. Яськів** // Космічна наука і технологія. — Київ, 2003. — Т. 9, № 2. — С. 331–337.

5. Yaskiv V. Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies / **V. Yaskiv** // 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC'04). — Aachen, Germany, 2004. — P. 1658–1662.

6. Яськів В. І. Експериментальне дослідження динамічних характеристик напівпровідникових перетворювачів електроенергії з високочастотними магнітними підсилювачами / **В. І. Яськів**, М. М. Юрченко, О. П. Гурник // Технічна електродинаміка. Темат. вип. : Силова електроніка та енергоефективність. — Київ, 2005. — Ч. 4. — С. 7–9.

Здобувачем проведено експериментальне дослідження динамічних характеристик перетворювача на вихідні параметри 5 В, 50 А.

7. Яськів В. І. Методи побудови напівпровідникових перетворювачів електроенергії з високим рівнем струму навантаження на основі високочастотних магнітних підсилювачів / **В. І. Яськів**, М. М. Юрченко // Технічна електродинаміка. Темат. вип. : Силова електроніка та енергоефективність. — Київ, 2006. — № 2. — С. 3–6.

Здобувачем проведено аналіз методів забезпечення паралельної роботи НПЕ та синтез методів забезпечення паралельної роботи ІСПН на ВМП.

8. Яськів В. І. Планування оптимального експерименту для побудови інтервальної моделі енергетичної характеристики високочастотних магнітних підсилювачів [Електронний ресурс] / М. Дивак, **В. Яськів**, А. Пукас // Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту. — Тернопіль, 2006. — Т. 11, № 3. — С. 169–177. — URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/29250>

Здобувачем створено інтервальну макромодель енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії.

9. Яськів В. І. Дослідження електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів електроенергії з високочастотними магнітними підсилювачами / **В. Яськів** // Технічна електродинаміка. Темат. вип. : Силова електроніка та енергоефективність. — Київ, 2008. — Ч. 4. — С. 68–71.

10. Яськів В. І. Забезпечення симетрування процесу перемагнічування силового трансформатора двотактного перетворювача напруги / **В. І. Яськів** // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнар. науково-техн. журн. — Хмельницький, 2009. — № 1. — С. 80–84.

11. Yaskiv V. Interval estimation of weight-dimshional characteristics of high-frequency magnetic amplifier of pulse power supplies / M. Dyvak, **V. Yaskiv**, A. Pukas // Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review). — 2009. — No 4. — P. 92–94.

Здобувачем проведено оптимізацію масо-габагитних характеристик осердь високочастотних магнітних підсилювачів на основі інтервальної макромодель енергетичної характеристики ВМП у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії.

12. Yaskiv V. Power factor correction as the right step towards a safer environment / A. Abramovitz, **V. Yaskiv**, K. Smedley // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). — 2013. — Vol. 89, no 3A. — P. 244–246.

Здобувачем обґрунтовано використання коректорів коефіцієнта потужності в НПЕ задля безпеки навколишнього середовища.

13. Yaskiv V. MagAmp Regulated Isolated AC-DC Converter with High Power Factor / **Volodymyr Yaskiv**, Alexander Abramovitz, Keyue Smedley, Anna Yaskiv // Communications (Scientific Letters of the University of Zilina). — Zilina, Slovakia : University of Zilina, 2015. — No 1A. — P. 28–34.

Здобувачем виготовлено дослідний зразок перетворювача на вихідні параметри 24 В, 10 А на основі ВМП з коректором коефіцієнта потужності та проведено його експериментальне дослідження.

14. Яськів В. І. Нові методи побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі / **В. І. Яськів** // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнар. науково-техн. журн. — Хмельницький, 2015. — № 4. — С. 92–96.

15. Yaskiv V. High-Frequency MagAmp Power Inverter / **Volodymyr**

Yaskiv, Anna Yaskiv // Computational Problems of Electrical Engineering. — Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2017. — Vol. 7, no 2. — P. 124–130.

Здобувачем проведено аналіз методів побудови керованих джерел електроживлення з виходом на змінному струмі, запропоновано використання ВМП для формування вихідної змінної напруги та метод керування зміною частоти вихідної напруги.

16. Yaskiv V. Synchronous rectification in High-Frequency MagAmp Power Converters [Electronic resource] / **Volodymyr Yaskiv**, Anna Yaskiv, Oleg Yurchenko // Advanced Computer Information Technologies Proceedings of the International Conference Advanced Computer Information Technologies, Ceske Budejovice, Czech Republic, June 1-3, 2018. (ACIT 2018). — Ceske Budejovice, Czech Republic : CEUR, 2018. — Vol. 2300. — P. 128–131. — URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2300/> (reference date: 23.03.2020).

Здобувачем запропоновано метод побудови НПЕ на ВМП з синхронним випрямленням.

17. Яськів В. І. Організація паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів / **В. І. Яськів**, А. В. Яськів // Праці Інституту електродинаміки Нац. академії наук України. — Київ, 2018. — № 51. — С. 81–85.

Здобувачем проведено синтез методу організації паралельної роботи ІСПН на ВМП, який забезпечує рівномірний розподіл струму навантаження між окремими стабілізаторами в усьому діапазоні його зміни при єдиному зворотному зв'язку за вихідною напругою. Сформульовано умови ввімкнення на паралельну роботу ІСПН на ВМП, які не вимагають врахування технологічного розкиду параметрів осердь.

18. Yaskiv V. Experimental Research of High-Frequency MagAmp Power Converters for Synchronous Rectification / **V. Yaskiv** // Оптико-волоконні та інформаційно-енергетичні технології : міжнар. науково-техн. журн. — Вінниця, 2019. — № 2 (38). — С. 113–121.

19. Yaskiv V. MagAmp Post-Regulator Small Signal Modeling / **V. Yaskiv** // Оптико-волоконні та інформаційно-енергетичні технології : міжнар. науково-техн. журн. — Вінниця, 2020. — № 1 (38). — С. 5–13.

20. Yaskiv V. Unregulated Transistor Inverter for High-Frequency MagAmp Power Converters / **Volodymyr Yaskiv**, Oleg Yurchenko // Computational Problems of Electrical Engineering. — Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2020. — Vol. 10, no 1. — P. 45–50.

Здобувачем вдосконалено метод керування силовими ключами транзисторного інвертора за рахунок забезпечення режиму перемагнічування дроселя насичення з прямокутною петлею гістерезису в колі додатного зворотного зв'язку за вихідною напругою інвертора з меншими втратами.

Патенти:

21. Пат. на винахід 30485 UA, МПК H02M 7/525. Імпульсний перетворювач постійної напруги / **Яськів В. І.**, Гурник О. П. ; заявник Яськів

Володимир Іванович. — № 98052485 ; заявл.13.05.1998 ; опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12.

Здобувачем запропоновано використання генератора струму на основі напівпровідникових елементів в колі додатного зворотного зв'язку за вихідною напругою високочастотного транзисторного інвертора з метою забезпечення перемагнічування дроселя насичення з прямокутною петлею гістерезису в режимі джерела струму з меншими втратами.

22. Пат. на винахід 39783 UA, МПК H02M 7/505. Спосіб ввімкнення транзисторних перетворювачів постійної напруги на синхронну і синфазну роботу та пристрій для його реалізації / **Яськів В. І.**, Гурник О. П. ; заявник Яськів Володимир Іванович. — № 98031280 ; заявл.12.03.1998 ; опубл. 15.01.2003, Бюл. № 1.

Здобувачем запропоновано використання єдиного незалежного рівня обмеження швидкості перемагнічування дроселя насичення з прямокутною петлею гістерезису в колі додатних зворотних зв'язків за вихідними напругами високочастотних транзисторних інверторів, ввімкнених на паралельну роботу, з метою забезпечення високої стабільності їх синхронної та синфазної комутації в 100% діапазоні зміни струму навантаження.

23. Пат. на винахід 74199 UA, МПК H02M 7/539, G05F 1/32. Кероване джерело електроживлення з виходом на змінному струмі струмі / **Яськів В. І.**, Гурник О. П. ; заявник Тернопільський держ. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. — № 2003021289 ; заявл.13.02.2003 ; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11.

Здобувачем запропоновано використання ВМП для формування додатної та від'ємної півхвиль вихідної змінної напруги та метод керування зміною частоти вихідної напруги.

24. Пат. України на винахід № 112102, МПК H02M 3/335. Стабілізатор постійної напруги / Яськів А. В., **Яськів В. І.** ; заявник Тернопільський нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. — № а201408531 ; заявл. 28.07.2014 ; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14.

Здобувачем реалізовано метод організації паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на високочастотних магнітних підсилювачах.

25. Пат. України на винахід № 112230, МПК H02M 3/335. Стабілізатор постійної напруги / Яськів А. В., **Яськів В. І.** ; заявник Тернопільський нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. — № а201412695 ; заявл. 26.11.2014 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.

Здобувачем реалізовано метод побудови ІСПН на ВМП з синхронним випрямленням.

26. Пат. України на винахід № 112231, МПК H02M 3/335. Стабілізатор постійної напруги / Яськів А. В., **Яськів В. І.** ; заявник Тернопільський нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. — № а201413122 ; заявл. 08.12.2014 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.

Здобувачем запропоновано керування польовим транзистором у вихідному фільтрі в ІСПН на ВМП здійснювати безпосередньо у функції напруг

дроселів насичення ВМП.

27. Пат. України на винахід № 115613, МПК H02M 7/519, H02M 3/337. Кероване джерело електроживлення з виходом на змінному струмі / **Яськів В. І.**, Марценюк А. С., Яськів А. В. ; заявник Тернопільський нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. — № а201602381 ; заявл. 12.03.2016 ; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22.

Здобувачем запропоновано використання спільного осердя ВМП для формування як додатної, так і від'ємної півхвилі вихідної змінної напруги.

28. Пат. України на винахід № 116670, МПК H02M 3/335. Імпульсний перетворювач постійної напруги / **Яськів В. І.**, Марценюк А. С., Яськів А. В., Мишковець О. П. ; заявник Тернопільський нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. — № а201602383 ; заявл. 12.03.2016 ; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8.

Здобувачем запропоновано використання понижуючого трансформатора в колі додатного зворотного зв'язку за вихідною напругою високочастотного транзисторного інвертора з метою забезпечення переманіччування дроселя насичення з прямокутною петлею гістерезису в режимі джерела струму з меншими втратами.

Публікації у матеріалах міжнародних конференцій, які індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus:

29. Yaskiv V. Development of switch power supplies for radar applications / **Volodymyr Yaskiv**, Oleg Shabliy, Anatoliy Alpatov, Olexandr Gurnik // 2001 CIE International Conference on Radar. — Beijing, China, 2001. — P. 851–855.

Здобувачем обґрунтовано та реалізовано використання НПЕ на ВМП для живлення радіопередавальних та приймальних пристроїв систем зв'язку.

30. Yaskiv V. Power supply systems of microprocessor devices / **Volodymyr Yaskiv**, Olexandr Gurnik, Svitlana Moskalyk, Natalya Shklyarenko // The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics. The VI-th International Conference. CADSM 2001. — Lviv-Slavsko, Ukraine, 2001. — P. 70–71.

Здобувачем сформульовано вимоги та приведено результати реалізації НПЕ на ВМП для мікропроцесорної техніки.

31. Yaskiv V. The new methods of switch mode power supply designing for computer facilities / **Volodymyr Yaskiv** // International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. IDAACS'2001. — Foros, Crimea, Ukraine, 2001. — P. 87–90.

Здобувачем сформульовано вимоги та приведено результати реалізації НПЕ на ВМП з високим рівнем струму навантаження для засобів цифрової техніки.

32. Yaskiv V. Method of inclusion on parallel operation of high-frequency inverters / **Volodymyr Yaskiv**, Olexandr Gurnik // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. The International Conference TCSET'2002. — Lviv-Slavsk, Ukraine, 2002. — P. 186.

Здобувачем реалізовано метод забезпечення паралельної роботи високочастотних транзисторних інверторів з високою стабільністю їх

синхронної та синфазної комутації.

33. Yaskiv V. The designing methods of controllable secondary power supply on the basis of high-frequency magnetic switches / **Volodymyr Yaskiv**, Olexandr Gurnik // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. The 7th International Conference CADSM 2003. — Lviv-Slavske, Ukraine, 2003. — P. 314–315.

Здобувачем запропоновано реалізацію методу побудови керованих перетворювачів напруги на основі ВМП з виходом на змінному струмі.

34. Yaskiv V. The comparative analysis of UPS topology / **Volodymyr Yaskiv**, Roman Hirnyak // International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. The International Conference TCSET'2004. — Lviv-Slavsko, Ukraine, 2004. — P. 520–521.

Здобувачем проведено аналіз структур джерел безперебійного живлення з метою їх реалізації з використанням НПЕ на ВМП.

35. Yaskiv V. On-Board Power Supply Systems with High-Frequency On-Board Net for Space Vehicles / **Volodymyr Yaskiv**, Petro Stachiv, Mykola Dyvak, Olexandr Gurnik // 2007 Compatibility in Power Electronics. — Gdansk, Poland, 2007. — P. 1–2.

Здобувачем запропоновано реалізацію структури бортової мережі космічних апаратів на основі НПЕ на ВМП.

36. Yaskiv V. MagAmp power converters with low level EMI / **Volodymyr Yaskiv**, Alexander Abramovitz, Keyue Smedley // XIIth International Conference. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013). — Lviv, Polyana, Ukraine, 2013. — P. 388–395.

Здобувачем проведено аналіз електромагнітних процесів в ІСПН на ВМП, проведено випробування НПЕ на ВМП на рівень електромагнітного випромінювання, проведено експериментальне дослідження дослідного зразка НПЕ на ВМП (24 В, 10 А) з коректором коефіцієнта потужності.

37. Yaskiv V. Performance evaluation of MagAmp regulated isolated AC-DC converter with high PF / **Volodymyr Yaskiv**, Anna Yaskiv, Alexander Abramovitz, Keyue Smedley // 10th International Conference ELEKTRO 2014. — Ražejcke Teplice, Slovakia, 2014. — P. 411–416.

Здобувачем запропоновано метод побудови високоефективних НПЕ на ВМП з коректором коефіцієнта потужності та проведено результати експериментальних досліджень.

38. Yaskiv V. Modular High-Frequency MagAmp DC-DC Power Converter / **Volodymyr Yaskiv**, Anatoliy Martseniuk, Anna Yaskiv, Oleg Yurchenko, Bohdan Yavorsky // 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). — Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019. — P. 213–216.

Здобувачем розроблено методи побудови модульних перетворювачів на основі ВМП з широким діапазоном зміни вхідної напруги та проведено експериментальне дослідження модульного перетворювача (12 В, 10 А).

39. Yaskiv V. Synchronous Rectifier in High-Frequency 24V/15A

MagAmp Power Converter / **Volodymyr Yaskiv**, Oleg Yurchenko, Anatoliy Martseniuk, Anna Yaskiv // 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). — Istanbul, Turkey, 2020. — P. 113–117.

Здобувачем проведено експериментальне дослідження методу побудови стабілізованого НПЕ на ВМП з синхронним випрямленням.

АНОТАЦІЇ

Яськів В. І. Високоєфективні напівпровідникові перетворювачі електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії» - Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

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

Запропоновано методи для вирішення актуальної задачі створення загальної концепції побудови високоєфективних компактних високочастотних НПЕ в широкому діапазоні вихідних потужностей (десятки Вт – одиниці кВт) та забезпечення високого рівня їх уніфікації задля мінімізації матеріальних, фінансових та інтелектуальних затрат на етапі як розробки перетворювачів, так і їх виробництва.

Розроблено інтервальну макромодель енергетичної характеристики високочастотного магнітного підсилювача у вигляді функції від вихідних параметрів перетворювачів електроенергії, яку покладено в основу методу оптимізації масо-габаритних та цінових характеристик осердь магнітних підсилювачів в широкому діапазоні вихідних потужностей з метою створення технології проектування уніфікованого ряду НПЕ з оптимальними масо-габаритними характеристиками осердь ВМП.

З метою побудови НПЕ з високим рівнем струму навантаження запропоновано та досліджено методи організації паралельної роботи як імпульсних стабілізаторів постійної напруги на високочастотних магнітних підсилювачах, так і високочастотних нерегульованих транзисторних інверторів, які забезпечують рівномірний розподіл струму навантаження між окремими стабілізаторами та високу стабільність синхронної та синфазної комутації високочастотних інверторів.

Запропоновано новий метод побудови керованих перетворювачів на основі ВМП з виходом на змінному струмі із широким діапазоном регулювання частоти вихідної напруги, який забезпечує низький рівень електромагнітних завад та високий рівень динамічних характеристик.

Запропоновано та досліджено методи побудови ІСПН на ВМП з

синхронним випрямленням, в яких керування польовими транзисторами випрямляча здійснюється безпосередньо у функції напруг височастотного силового трансформатора інвертора, а керування польовим транзистором у вихідному фільтрі у функції уже наявних в НПЕ напруг дроселів насичення ВМП без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування ними.

Результати проведених експериментальних досліджень електромагнітної сумісності НПЕ на ВМП засвідчили низький рівень їх електромагнітних завад випромінювання. Задля покращення електромагнітної сумісності запропоновано та досліджено використання в цих перетворювачах коректорів коефіцієнта потужності, що реалізують принцип ОСС (One Cycle Control).

Проведено дослідження в частотній області НПЕ на ВМП при замкнутому зворотному зв'язку з використанням пакета прикладних програм PSPICE.

Результати роботи використано при проектуванні 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).

Ключові слова: височастотний магнітний підсилювач, прямокутна петля гістерезису, паралельна робота, синхронний випрямляч, інтервальна модель енергетичної характеристики.

Яськів В. И. Высокоэффективные полупроводниковые преобразователи электроэнергии на основе высокочастотных магнитных усилителей. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 «Полупроводниковые преобразователи электроэнергии» - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы усовершенствования методов и средств для преобразования параметров электроэнергии в полупроводниковых преобразователях на основе высокочастотных магнитных усилителей.

Предложены методы построения высокоэффективных компактных высокочастотных преобразователей электроэнергии в широком диапазоне выходных мощностей (десятки Вт - единицы кВт) с обеспечением высокого уровня их унификации: методы организации параллельной работы как импульсных стабилизаторов постоянного напряжения на высокочастотных магнитных усилителях (ИСПН на ВМУ), так и высокочастотных нерегулируемых транзисторных инверторов; методы построения ИСПН на ВМУ с синхронным выпрямлением; метод построения управляемых преобразователей на основе ВМУ с выходом на переменном токе с широким

диапазоном изменения частоты выходного напряжения; метод оптимизации массо-габаритных и ценовых характеристик магнитопроводов магнитных усилителей в широком диапазоне выходных мощностей на основе разработанной интервальной макромодели энергетической характеристики ВМУ. Проведено экспериментальное исследование электромагнитной совместимости преобразователей на ВМП. Предложено использовать корректоры коэффициента мощности, которые реализуют принцип ОСС (One Cycle Control). Проведено исследование преобразователей на ВМП при замкнутой обратной связи в частотной области с использованием пакета прикладных программ PSPICE.

Результаты работы использованы при проектировании управляемого трехканального импульсного источника питания для электрических тормозов системы электропривода антенны большого диаметра (ГНТП «ТЕХАС-К», г. Тернополь), импульсного источника питания автомобильного радиосканера (ООО НПФ «Интеграл», г. Тернополь), источников питания радиопередающих и приемных устройств систем дистанционного управления энергообъектами и учета электроэнергии (ООО ТКБР «Стрела», г. Тернополь).

Ключевые слова: высокочастотный магнитный усилитель, прямоугольная петля гистерезиса, параллельная работа, синхронный выпрямитель, интервальная модель энергетической характеристики.

Yaskiv V. I. High-efficiency semiconductor power converters based on high-frequency magnetic amplifiers. Manuscript.

Dissertation on achieving the scientific degree Doctor of Technical Science in specialty 05.09.12 Semiconductor Power Converters – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021.

The dissertation is devoted to a solution of an actual scientific and applied problem of improvement of methods and means of electric power conversion parameters in semiconductor converters on the basis of high-frequency magnetic amplifiers.

Methods for solving the topical problem of creating a general concept for high-efficiency compact high-frequency power converters design with a wide range of output powers (tens of W - kW), and ensuring a high level of their unification to minimize material, financial and intellectual costs at the stages of power converters development and production were proposed.

There was developed an interval macromodel of energy characteristic of high-frequency magnetic amplifier as a function of power converters' output parameters. It is the basis of the method for optimizing mass and dimensions, and price of MagAmp cores in a wide range of output power to create the design technology for unified series of power converters with optimal MagAmp core weight and dimensions characteristics.

In order to design power converters with a high level of load current, the methods of parallel operation organization for both pulse DC voltage regulators on high-frequency magnetic amplifiers, and high-frequency unregulated transistor inverters are proposed and investigated. Uniformity of the load current distribution

between the individual stabilizers is ensured by a single feedback on the output voltage and does not depend on the technological variance of the MagAmp cores' parameters. The high stability of synchronous and in-phase switching of high-frequency inverters is determined by the only independent level of the remagnetisation rate limit of MagAmp core with rectangular hysteresis loop in the inverters positive feedback loops by output voltages. Both methods are implemented without the introduction of any additional feedback loops, provided that there are no specialized control circuits and additional power supply for them, at minimal use of discrete elements for the entire system. The result is achieved by coherence and interaction of electromagnetic processes in semiconductor and magnetic elements.

A new method for design of controlled power converters based on high-frequency MagAmps with AC output with a wide range of output voltage frequency regulation is proposed. It provides a low level of electromagnetic interference and a high level of dynamic characteristics.

A method for design of power converters based on high-frequency MagAmps with synchronous rectification is proposed and investigated. It allows control of field-effect transistors of the rectifier directly as a function of the voltages of the inverter's high-frequency power transformer, and excludes the flow of short circuit currents in the rectifier without introducing any additional elements or control circuits for them. To achieve a higher efficiency of the power converters, it is proposed to control the MOSFET, which is used instead of the diode in the output filter of the power converter, in the function of the already existing MagAmp voltages. Moreover, this method of output filter realization does not require any additional elements or control circuits. The carried out experimental study of the proposed methods confirms their effectiveness and ensuring high efficiency of the power converters in a 100% range of load current variation.

The results of experimental studies of the electromagnetic compatibility of power converters based on high-frequency MagAmps showed a low level of their electromagnetic interference. To improve the electromagnetic compatibility, the use of power factor correctors based on the principle of OCC (One Cycle Control), has been proposed and investigated.

A mathematical model of Magamp power converter was derived. It was investigated in a frequency domain for a closed feedback loop using PSPICE software package.

The results were used in the design of a controlled three-channel switching power supply for electric brakes of the electric drive system of large diameter antenna (State Scientific Production Firm TEXAS-K, Ternopil,) switching power supply of car radio scanner (Scientific Production Firm Integral, Ternopil,) power supply radio transmitting and receiving devices of systems for remote control of power objects and the accounting of electric power (Ternopil Design Office Strila, Ternopil.)

Keywords: high-frequency magnetic amplifier, rectangular hysteresis loop, parallel operation, synchronous rectifier, interval model of energy characteristic.

