

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ УВАНА ПУЛЮЯ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

Яськів Володимир Іванович

УДК 621.314

ДИСЕРТАЦІЯ

ВИСОКОЕФЕКТИВНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії
14 – електрична інженерія

Подається на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

*Ідентифіковано за змістом
з кращим прикладом
дисертації як свідують
вчений секретар спеці-
алізованої комісії*



В.І. Яськів

Науковий консультант
Юрченко Олег Миколайович,
доктор технічних наук,
професор

№ 64.0

Вин

25.01.20



Тернопіль – 2020

АНОТАЦІЯ

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, 2020.

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

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.

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.

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

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

вищу ефективність, надійність та унеможливило протікання наскрізних струмів у випрямлячі. Для підвищення ефективності, а також забезпечення комплексності системи реалізовано запропонований метод побудови вихідного LCD-фільтра, в якому керування польовим транзистором, що використовується замість діода, здійснюється у функції уже наявних напруг дроселів насичення ВМП без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування ним (рис. 8).

На основі проведеного аналізу методів побудови керованих джерел електроживлення з виходом на змінному струмі встановлено наступні недоліки: низький рівень електромагнітної сумісності, складність процесу формування вихідної змінної напруги, не завжди задовільні динамічні характеристики. З метою їх усунення розроблено метод побудови високодинамічних керованих перетворювачів на основі ВМП з виходом на змінному струмі з високою якістю вихідних напруг та із широким діапазоном регулювання частоти вихідної напруги (рис. 9). Причому для формування як додатної, так і від'ємної півхвиль вихідної змінної напруги в кожному плечі випрямляча використовується спільне осердя ВМП. Формування змінної напруги забезпечується на високій робочій частоті вхідного транзисторного інвертора, що в поєднанні з властивостями ВМП забезпечує можливість формування прецизійної вихідної напруги, забезпечує високий рівень динамічних характеристик та електромагнітної сумісності.

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

ключами за рахунок організації режимів роботи в колах керування з меншими втратами.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Саме принцип роботи ВМП (затримка появи струму навантаження в силовому колі, обумовлена часом перемагнічування досягнення насичення в робочому півперіоді) унеможлиблює появу наскрізних струмів при двотактному випрямленні, що дозволило безпосереднє використання синхронних випрямлячів у перетворювачах на основі ВМП.

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

Наведені приклади практичної реалізації керованого трьохканального імпульсного джерела живлення електричних гальм системи електроприводу антени великого діаметра (ДНТП «ТЕХАС-К», м. Тернопіль), імпульсного джерела живлення автомобільного

радіосканера (ТОВ НВФ «Інтеграл», м. Тернопіль), джерела живлення радіопередавальних та приймальних пристроїв систем дистанційного керування енергооб'єктами та обліку електроенергії (ТОВ ТКБР «Стріла», м. Тернопіль).

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

ANNOTATION

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, 2020.

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.

In the first chapter the state of the problem of high-frequency semiconductor power converters design is analyzed. The criteria choice for such power converters design is reasoned. An alternative approach to semiconductor power converters design with the use of high-frequency magnetic amplifiers (MagAmps) is proposed, and the principle of their operation is described. Comparative analysis of MagAmp switch and power switch based on semiconductor components is carried out. Electromagnetic processes in a MagAmp pulse power supply are analyzed. Magnetization modes of a magnetic core with a rectangular hysteresis loop are considered. The characteristics of MagAmp high-frequency magnetic alloys with a rectangular hysteresis loop are given. There is discovered a need for improvement of the methods and means of electric power conversion in high-frequency MagAmp power converters.

The peculiarities of a basic dc pulse magamp power converter topology are considered **in the second chapter**. It is shown that price characteristics of a unified series of dc pulse magamp power converters are determined directly by MagAmp core price. Thus, optimization of MagAmp core weight and dimensions characteristics is required for design of the unified series of power converters.

An experimental approach to weight and dimensions characteristics analysis of MagAmp as of a functional unit of the power converter is proposed and reasoned. It is shown that to implement this approach in order to minimize the price of the research, it is reasonable to use the methods of optimal experiment planning. A scheme of carrying out the experimental research is proposed.

Based on the reasoned experimental approach, for the first time there was developed an interval macromodel of energy characteristic of high-frequency magnetic amplifier as a function of power converters' output parameters. It allows computation of the numerical interval for MagAmp output power for given power converter's design parameters such as nominal output voltage and maximum load current.

Based on the obtained interval macromodel of MagAmp energy characteristic, a generalized MagAmp core weight and dimensions characteristics optimization algorithm is developed. The algorithm is realized as step-by-step formalized procedures, allowing its use within the design technology of the unified series of power converters with optimal MagAmp core weight and dimensions characteristics.

In the third chapter the suggested methods of MagAmp power converters design are considered for ensuring high level of load current and high efficiency of power converters. They are based on the following statements:

- absence of any auxiliary feedback loops, control circuits, snubber circuits, or other electric components;
- maximum utilization of already present components in the power converter;
- maximum utilization of already present signals from the components that determine the power converter's operation;
- providing maximum possible converter's efficiency;

- providing functioning within 100% range of load current change;
- minimal expenses to reach the set goal.

A new method of organizing parallel operation of pulsed DC voltage stabilizers on high-frequency magnetic amplifiers is proposed, which provides uniform load current distribution between individual stabilizers in the whole range of its change when all destabilizing factors change due to the use of a common Magamp core as a regulating element. This makes it impossible to influence the technological variance of the parameters of the saturable cores on the uniformity of the load current distribution. The conditions of switching on parallel operation of pulsed DC voltage stabilizers are formulated. The proposed method provides a uniform distribution of load current with a single feedback on the output voltage. Thus the control scheme of all pulsed DC voltage stabilizers is similar to the control scheme of one unit.

MagAmp voltage stabilizer is modeled in this chapter, including its control loop small signal modeling.

A method for design of power converters based on high-frequency MagAmps with synchronous rectification is proposed for the first time 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, the suggested LCD-filter design method is used. It consists in controlling 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.

Based on the carried out analysis of controlled ac power supplies design methods, the following drawbacks were spotted: low level of electromagnetic compatibility, ac output voltage forming complexity, not always satisfactory

dynamic characteristics. To eliminate these, a new design method of controlled MagAmp power converters with AC output, high quality of output voltage, and wide range of output voltage frequency regulation is proposed. It provides a low level of electromagnetic interference and a high level of dynamic characteristics. Moreover, to form both positive and negative voltage half-periods, in every line of a push-pull rectifier a common MagAmp core is used. The ac voltage is formed on high frequency of input transistor inverter, that together with MagAmp properties allows forming of high-precision output voltage, provides high level of dynamic characteristics and electromagnetic compatibility.

In the fourth chapter ways of remagnetization modes symmetrization of power transformer in push-pull power converter are analyzed. The choice of basic high-frequency transistor inverter for joint operation with Magamp power converters is reasoned. The method of organization of parallel operation of such inverters is improved. The method of power switches control is improved due to control circuits operation modes organization with lower losses.

The method of organization of parallel operation of high-frequency uncontrolled transistor inverters with high stability of synchronous and synphase commutation in 100% range of change of all distortion factors is improved. High stability of commutation frequency is obtained due to setting one independent level (for all inverters, working in parallel) of limiting the remagnetization speed of MagAmp with rectangular hysteresis loop in positive feedback loops for inverters' output voltages while operating in current supply mode.

The results of experimental investigation of MagAmp power converters' magnetic compatibility are given **in the fifth chapter**. The main international standards that regulate electromagnetic interferences levels are analyzed. The results of the research of MagAmp power converters with and without power factor correction (PFC) are given. For MagAmp power converters it is

suggested to use PFC, based on one cycle control (OCC) methodology, where control is performed within one switching cycle. Comparative analysis of power converters' topologies is done, regarding their electromagnetic compatibility.

Experimental research of the level of MagAmp power converters electromagnetic interferences was carried out for an experimental 24V, 8A power supply without PFC in Power Electronics Laboratory at University of California (UCI), Irvine, USA within the framework of joint scientific project "High-Reliability Switching Power Converters for Security of Information Technology" (IC S.NUKR.CLG 982639) (a grant from NATO in a framework of the programme "Nato Programme Security Through Science").

Experimental research of MagAmp power converters electromagnetic compatibility proved the low level of radiative electromagnetic interferences. In the frequency range of 42 MHz to 400 MHz level of radiative electromagnetic interferences of the designed sample is lower than the one of an American analog (particularly, it is 4-5 times lower in the frequency range of 130-200 MHz).

For the investigation of MagAmp power converters with PFC, a 24V, 10A power converter was built. A specialized integrated circuit IR1150, where the OCC method is realized, was used for PFC control. Its advantages are ensuring a high dynamics level in the corrector, and a possibility of PFC realization in the range of output powers of a few hundred watts to a few kilowatts.

Lower level of electromagnetic interferences (EMI) of the investigated power converter is ensured by using MagAmps as power switches, whose operation in switching mode is not followed by the large high-frequency interference, and since they are conductive EMI filters both when saturated and not saturated. High levels of efficiency and PFC are ensured by optimal combination of PFC realization methods with the proposed methods of MagAmp power converters design.

In the sixth chapter there are carried out the experimental research of MagAmp power converter's dynamic characteristics, experimental research of MagAmp power converter with synchronous rectifier with open loop, experimental research of stabilized MagAmp power converter with synchronous rectifier. There are given examples of practical realization of power converters according to clients' requirements.

For experimental research of dynamic characteristics, a 5V, 50A MagAmp power converter was developed. In this power converter, the design method of MagAmp power converters with high level of load current, described in chapter 3, was realized.

The experimental research proved high level of dynamic characteristics and absence of any overvoltage transient. Transient process finishes at the moment when the regulated value (output voltage) reaches its stable level, thus it significantly decreases its length. With cyclic 100% load change at 5 kHz frequency, transient time equals to 1.8 ms.

The experimental research of MagAmp power converter with synchronous rectifier was split into two stages: open loop research, and research of stabilized MagAmp power converter.

In both cases the unregulated high-frequency transistor inverter is realized using half-bridge topology. The research was carried out at input dc voltage $V=310V$ (equivalent of the voltage of industrial frequency).

It is MagAmp operation principle (load current delay in the power circuit is determined with the remagnetization time necessary for reaching the saturation level within the working half-period) that eliminates the occurrence of short-circuit currents during push-pull rectification, which allowed using synchronous rectifiers directly in MagAmp power converters.

The research carried out shows that modern MOSFETs with little open channel resistance provide high efficiency of MagAmp power converter. In our

case, efficiency of the power converter with the load current change range between 3-11A (within over 50% range) exceeds 94%.

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 TEHAS-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

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-dimensional 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-габагітних 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. MagApm 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 Н02М 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 Н02М 7/519, Н02М 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 півхвиль вихідної змінної напруги.

28. Пат. України на винахід № 116670, МПК Н02М 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 перемагнічування 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. — Rajecke 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.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	32
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	45
1.1. Аналіз критеріїв та шляхів побудови вискоефективних напівпровідникових перетворювачів електроенергії.....	45
1.2. Високочастотний магнітний підсилювач як силовий ключ в напівпровідниковому перетворювачі електроенергії.....	61
1.3. Принцип роботи регулятора напруги на основі високочастотного магнітного підсилювача	63
1.4. Аналіз електромагнітних процесів в імпульсному стабілізаторі напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів.....	66
1.5. Порівняння ключа на основі ВМП з напівпровідниковими ключами	72
1.6. Високочастотні магнітом'які матеріали з прямокутною петлею гістерезису.....	76
1.7. Постановка задачі	79
1.8. Висновки до розділу 1.....	81
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ.....	82
2.1. Особливості організації базової схеми стабілізатора ІСПН на ВМП..	82
2.2. Основні гіпотези для побудови інтервальної моделі енергетичної характеристики ВМП.....	86
2.3. Інтервальна модель енергетичної характеристики ВМП	88
2.4. Узагальнений метод оптимізації масо-габаритних характеристик ВМП на основі інтервальної моделі енергетичної характеристики ВМП .	95
2.5. Висновки до розділу 2.....	102
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПОБУДОВИ	

ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ВИХІДНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ.....	104
3.1. Організація паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на високочастотних магнітних підсилювачах (ІСПН на ВМП)..	104
3.1.1. Існуючі методи забезпечення паралельної роботи ІСПН на ВМП.....	104
3.1.2. Пропонований метод забезпечення паралельної роботи ІСПН на ВМП.....	111
3.2. Моделювання імпульсного стабілізатора постійної напруги на ВМП	114
3.2.1. Аналіз силової частини регулятора на ВМП.....	114
3.2.2. Схема керування ВМП.....	118
3.2.3. Моделювання ІСПН на ВМП.....	119
3.2.4. Комп'ютерне імітаційне моделювання ІСПН на ВМП.....	124
3.3. Синхронне випрямлення в НПЕ постійного струму.....	126
3.3.1. Аналіз стану проблеми.....	126
3.3.2. Синхронний випрямляч в ІСПН на ВМП.....	128
3.3.2.1. Метод побудови ІСПН на ВМП з синхронним випрямленням....	128
3.3.2.2. Метод реалізації вихідного LCD-фільтра в ІСПН на ВМП.....	133
3.4. Керовані НПЕ з виходом на змінному струмі.....	138
3.4.1. Основні структури НПЕ з виходом на змінному струмі.....	139
3.4.2. Керовані НПЕ на ВМП з виходом на змінному струмі.....	145
3.4.2.1. Базова структура НПЕ на ВМП з виходом на змінному струмі....	145
3.4.2.2. Вдосконалений метод побудови НПЕ на ВМП з виходом на змінному струмі.....	148
3.5. Регульований помножувач напруги на основі регулятора на ВМП	152
3.6. Висновки до розділу 3	156

РОЗДІЛ 4. ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ІНВЕРТОР ДЛЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ З РЕГУЛЯТОРАМИ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ.....	159
4.1. Вимоги до високочастотного нерегульованого транзисторного інвертора для сумісної роботи ІСПН на ВМП.....	159
4.2. Симетрування режимів перемагнічення високочастотного силового трансформатора в двотактному перетворювачі.....	160
4.3. Базова схема високочастотного нерегульованого транзисторного інвертора.....	165
4.4. Вдосконалений високоефективний високочастотний нерегульований транзисторний інвертор ВМП.....	170
4.5. Експериментальне дослідження високочастотного нерегульованого транзисторного інвертора	175
4.6. Організація паралельної роботи високочастотних нерегульованих транзисторних інверторів	180
4.7. Висновки до розділу 4.....	182
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ.....	193
5.1. Загальні положення.....	193
5.2. Експериментальне дослідження електромагнітної сумісності НПЕ на ВМП без коректора коефіцієнта потужності.....	197
5.3. Експериментальне дослідження рівня випромінюваних електромагнітних завад НПЕ на ВМП.....	205
5.4. Експериментальне дослідження НПЕ на ВМП з коректором коефіцієнта потужності.....	208
5.4.1. Загальна концепція побудови перетворювачів на магнітних	

підсилювачах з коректором коефіцієнта потужності.....	208
5.4.2. Високочастотний нерегульований перетворювач постійної напруги.....	211
5.4.3. Короткий огляд вторинних регуляторів на магнітних підсилювачах.....	212
5.4.4. Схема керування магнітним підсилювачем.....	214
5.4.5. Результати експериментальних досліджень НПЕ на ВМП з коректором коефіцієнта потужності.....	216
5.5. Дослідження коефіцієнта гармонік вхідного струму.....	223
5.6. Приклад реалізації коректора коефіцієнта потужності.....	226
5.7. Висновки до розділу 5.....	233
РОЗДІЛ 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНИХ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ТА ЇХ ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ.....	235
6.1. Експериментальне дослідження динамічних характеристик НПЕ на ВМП.....	235
6.2. Експериментальне дослідження НПЕ на ВМП з синхронним випрямленням.....	243
6.2.1. Експериментальне дослідження НПЕ на ВМП з синхронним випрямленням при розірваному зворотному зв'язку за вихідною напругою.....	244
6.2.2. Експериментальне дослідження стабілізованого НПЕ на ВМП (24 В, 15 А) з синхронним випрямленням.....	254
6.3. Практична реалізація НПЕ на ВМП.....	264
6.3.1. Побудова модульних перетворювачів електроенергії на основі	

ВМП.....	264
6.3.2. Кероване імпульсне трьохканальне джерело живлення електричних гальм системи електроприводу антени великого діаметра...	266
6.3.3. Імпульсне джерело живлення автомобільного радіо сканера.....	267
6.3.4. Імпульсне джерело живлення радіопередавальних та приймальних пристроїв системи дистанційного керування енергооб'єктами та обліку електроенергії.....	269
6.4. Висновки до розділу 6.....	269
ВИСНОВКИ.....	272
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	276
ДОДАТКИ.....	305
Додаток А. Список публікацій Яськіва В.І. за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	306
Додаток Б. Характеристики осердь високочастотних магнітних підсилювачів	317
Додаток В. Порівняльна характеристика основних топологій перетворювачів з врахуванням їх електромагнітної сумісності	323
Додаток Г. Протоколи випробувань дослідних зразків напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі високочастотних магнітних підсилювачів.....	327
Додаток Д. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	330