

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

**Бурлака Володимир Володимирович**



УДК 621.791.75

**РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНИХ І НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ПРИНЦИПІВ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ІНВЕРТОРНИХ  
ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ І  
СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Спеціальність 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Краматорськ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет” Міністерства освіти і науки України, м. Маріуполь.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор  
**Гулаков Сергій Володимирович**  
ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”, професор кафедри металургії і технології зварювального виробництва.

**Офіційні опоненти:**

**Коротинський Олександр Євтихійович**,  
доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторії джерел живлення ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ;

**Малінов Володимир Леонідович**,  
доктор технічних наук, доцент, експерт з матеріалів та зварювання ТОВ “Бюро Верітас Україна”, м. Маріуполь;

**Єфіменко Микола Григорович**,  
доктор технічних наук, професор, професор кафедри зварювання НТУ “ХПІ”, м. Харків.

Захист відбудеться 21 вересня 2018 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02 Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, корп. 2, ауд. 2313.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, корп. 1 або web-адресою: <http://www.dgma.donetsk.ua/zahistiu-radi-d12.105.02.html>.

Автореферат розісланий «\_03\_» \_\_\_08\_\_\_ 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 12.105.02,  
кандидат технічних наук, доцент



С.Л. Міранцов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У зв'язку з постійно зростаючою вартістю енергоносіїв, в т.ч. електроенергії, енергозбереження є виключно актуальною проблемою.

У сучасному виробництві зварювання характеризується великим обсягом застосування і є одним з важливих технологічних процесів, а основною частиною зварювального устаткування, що випускається, є джерела живлення для дугового зварювання. Тому створення високоефективних зварювальних джерел живлення, що забезпечують перетворення енергії з високим ККД і задовольняють сучасним стандартам електромагнітної сумісності технічних засобів є важливою науковою і практичною задачею.

Основна тенденція розвитку зварювальних джерел живлення - поліпшення і збільшення ступеня взаємодії між об'єктом управління (зварювальною електричною дугою, розплавленим електродним металом і зварювальною ванною) і джерелом живлення.

Завдяки розвитку технології інверторних джерел, що мають підвищену швидкодію, з'явилися технології забезпечення контрольованого перенесення електродного металу, зниження розбризкування і ін. Але при цьому часто залишається без уваги проблема електромагнітної сумісності інверторних зварювальних джерел живлення з мережею. Інверторні зварювальні джерела є потужними генераторами струмів вищих гармонік, що призводить до порушення режиму роботи електричної мережі, підвищення втрат енергії в ній, спотворення форми кривої напруги. Більш того, невідповідність більшості інверторних джерел сучасним стандартам електромагнітної сумісності не дозволяє організувати їх експорт.

Тому в пропонованій роботі основна увага приділяється розробці таких підходів до створення зварювальних інверторних джерел живлення, які дозволять або усунути, або компенсувати негативні ефекти, пов'язані з їх роботою в електричній мережі, і забезпечити виконання вимог стандартів електромагнітної сумісності при збереженні якості реалізації технологічного процесу зварювання (наплавлення і ін. супутніх процесів). У зв'язку з цим дана робота є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на основі програм держбюджетних науково-дослідних робіт ДВНЗ «ПДТУ» за темами «Розробка наукових і технологічних основ створення енергоефективних зварювальних джерел живлення з інтегрованими функціями активної фільтрації вищих гармонік» (2012 – 2014 рр., номер держреєстрації 0112U000499), «Розробка наукових основ проектування енергоефективних засобів компенсації реактивної потужності та активної фільтрації вищих гармонік в електричних мережах» (2015 – 2017 рр., номер держреєстрації 0115U000170), «Розробка імпульсних перетворювачів з функціями підвищення енергоефективності розподільчих електричних мереж» (розпочата в жовтні 2017 року, номер держреєстрації 0117U003995). Робота підтримана грантом Президента України (2014 р., проект № GP / F56 / 099 «Розробка імпульсних АС-DC перетворювачів з функціями підвищення якості електроенергії»). Матеріали роботи використані в госпдоговірній НДР «Разработка системы управления возбудительными устройствами бесщеточных возбудителей

синхронних двигателів компресорів КТК кислородного цеха» (замовник - ПрАТ «МК«Азовсталь», договір 04 / 0148Н від 16.06.2014 р., м. Маріуполь).

**Об'єкт досліджень** – електромагнітні процеси, що протікають в інверторних зварювальних джерелах живлення, мережі живлення і електричній зварювальній дузі.

**Предмет досліджень** – управління процесом перетворення параметрів електричної енергії в інверторних зварювальних джерелах живлення.

**Мета і завдання досліджень**

Метою дисертаційної роботи була розробка теоретичних і науково-технологічних принципів створення інверторних джерел живлення для зварювальних процесів і споріднених технологій. Створювані джерела повинні забезпечувати високу ефективність перетворення електричної енергії, мати хороші масогабаритні параметри, високу швидкодію і відповідати сучасним стандартам електромагнітної сумісності технічних засобів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні науково-технічні задачі:

1. Розробити наукові підходи до побудови схем інверторних зварювальних джерел живлення з поліпшеною енергоефективністю та електромагнітною сумісністю (корекцією коефіцієнта потужності).

2. Розробити енергоефективні схеми активних випрямлячів для зварювальних джерел з корекцією коефіцієнта потужності.

3. Розробити принципи побудови схем і алгоритми управління інверторними зварювальними джерелами живлення прямого перетворення.

4. Розробити теоретичні та науково-технічні принципи створення зварювальних джерел живлення, що поліпшують якість напруги мережі живлення.

5. Розробити схемні рішення і алгоритми управління пристроями стабілізації горіння дуги в складі зварювальних джерел живлення.

6. Розробити науково-технічні принципи побудови зварювальних джерел живлення змінного струму для TIG процесу зварювання алюмінію і його сплавів.

7. Провести дослідно-промислове випробування розробленого обладнання.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань використовувався математичний апарат аналізу і синтезу систем автоматичного управління безперервної і імпульсної дії; теорія лінійних і нелінійних електричних ланцюгів; пряме і зворотне перетворення Фур'є; математичний апарат цифрової обробки сигналів; методики розрахунку процесів в імпульсних перетворювачах електроенергії. Достовірність результатів розрахунків підтверджена їх зіставленням з результатами експериментів. Експериментальні дослідження проводились з використанням існуючого, а також спеціально розробленого і виготовленого автором електротехнічного, електронного та спеціального вимірювального обладнання. Обробка експериментальних даних проведена з використанням як існуючого, так і спеціально створеного автором програмного забезпечення.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

Створено основи нового напрямку в розробці зварювальних інверторних джерел живлення з функціями поліпшення якості напруги мережі.

Запропоновано новий підхід до вирішення комплексної задачі створення зварювальних інверторних джерел живлення прямого перетворення з корекцією коефіцієнта потужності, що полягає в безпосередньому перетворенні напруги мережі в високочастотну змінну напругу з середньовипрямленим значенням, пропорційним квадрату миттєвої напруги мережі, з подальшою високочастотною трансформацією, випрямленням і складанням за рахунок послідовного з'єднання виходів випрямлячів.

Вперше запропоновано спосіб управління активним випрямлячем джерела живлення, що забезпечує поліпшення якості напруги мережі живлення за рахунок установки вхідного струму активного випрямляча пропорційно різниці миттєвої напруги мережі і опорної синусоїдальної ЕРС, що формується петлею фазового автопідстроювання частоти і синхронізованою з першою гармонікою частоти мережі, причому амплітуда цієї ЕРС встановлюється максимальною, але такою, щоб миттєва активна потужність випрямляча була позитивною, а коефіцієнт пропорціональності для вхідного струму встановлюється з умови балансу вихідної потужності активного випрямляча і потужності його навантаження.

Запропоновано новий підхід до створення інверторних зварювальних джерел живлення подвійного перетворення з корекцією коефіцієнта потужності, що полягає у використанні випрямлення напруги мережі з подальшим згладжуванням за допомогою фільтра з інвертором напруги, включеним послідовно з навантаженням, при цьому вихідну напругу інвертора встановлюють з умови сталості вихідного струму випрямляча, а живлення інвертора виконують або від напруги на навантаженні, або від мережі, при цьому в останньому випадку вхідні струми інвертора встановлюють з умови максимуму коефіцієнта потужності системи «випрямляч + інвертор».

Дістав подальшого розвитку науково-прикладний напрямок: створення зварювальних джерел живлення змінного струму із застосуванням силових послідовних активних фільтрів, в яких регулювання зварювального струму виконується керованим джерелом ЕРС, а завдання на струм дуги формують у вигляді періодичної кривої з частотою мережі і нульовим середнім значенням.

Вперше запропоновано науковий підхід до побудови однофазних зварювальних інверторних джерел живлення з комплексним вирішенням завдань забезпечення електромагнітної сумісності та стабілізації горіння дуги, який відрізняється тим, що крива споживаного від мережі струму формується за рахунок модуляції активної потужності інвертора, а стабільність горіння дуги забезпечується за рахунок введення в інвертор елементів формування струму чергової дуги з реактивним його обмеженням і зміні робочої частоти інвертора з умови її пропорційності миттєвому значенню напруги його живлення.

Запропоновано новий підхід до створення універсальних пристроїв підпалу і стабілізації горіння дуги, що полягає у використанні резонансних явищ в елементах зварювального контуру, при цьому частота збудження контуру встановлюється вище резонансної з подальшим зменшенням до досягнення заданого запасу енергії в елементах контуру.

**Практична цінність.** 1. Розроблено нові схемні рішення і алгоритми управління активними випрямлячами з корекцією коефіцієнта потужності для зварювальних інверторних джерел живлення з подвійним перетворенням, які

характеризуються зниженими втратами енергії і зменшеним числом напівпровідникових компонентів в силовому ланцюзі.

2. Розроблено нові схемні рішення і алгоритми управління інверторними зварювальними джерелами живлення з прямим перетворенням і корекцією коефіцієнта потужності, що забезпечують споживання від мережі струму з низьким вмістом вищих гармонік, що мають прості алгоритми управління і невелике число силових напівпровідникових ключів.

3. Розроблено алгоритм управління активними випрямлячами, що дозволяє поліпшувати якість напруги мережі живлення. Алгоритм можна використовувати для всіх інверторних зварювальних джерел, що мають пряме управління мережевим струмом.

4. Розроблено зварювальне джерело живлення змінного струму на основі послідовного активного фільтра, що дозволяє реалізувати TIG, MIG, MMA процеси при використанні нерегульованого зварювального трансформатора з нормальним розсіюванням. У джерелі забезпечена безступінчата регулювання зварювального струму, компенсація постійної складової при TIG зварювання алюмінію і його сплавів, підвищена стабільність горіння дуги за рахунок збільшення швидкості зміни зварювального струму при переході його через нуль.

5. Розроблено однофазне зварювальне інверторне джерело живлення з підвищеним коефіцієнтом потужності, функцією стабілізації горіння дуги за рахунок підвищеної напруги холостого ходу і поліпшеним використанням високочастотного силового трансформатора за рахунок стабілізації амплітуди магнітного потоку шляхом корекції частоти перемикання інвертора.

6. Розроблено універсальні пристрої підпалу і стабілізації горіння дуги, що забезпечують підпал дуги при мінімальній енергії розряду. Пристрої придатні для спільної роботи як з низькочастотними, так і з інверторними зварювальними джерелами живлення постійного і змінного струму.

7. Результати роботи випробувані в умовах ПрАТ «МК«Азовсталь», ПАТ «Науково-дослідний і проектно-технологічний інститут машинобудування» (м. Краматорськ), ТОВ «ТехМашСтрой 2012», ПАТ «Маркограф», ДП «Маріупольський морський торговельний порт», ЗАТ «Гідромаш», впроваджені в навчальний процес ДВНЗ «ПДТУ». Економічний ефект становить 1 684 000 грн.

Позитивною особливістю роботи є те, що розроблені джерела живлення можуть бути використані не тільки для реалізації зварювальних і супутніх процесів, а й в інших областях: машинобудуванні, металургії, енергетиці, медицині, оборонній промисловості та ін.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертаційній роботі внесок автора полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи; формулюванні цілей і завдань дослідження; виборі підходів і методів математичного опису та моделювання електромагнітних процесів, що відбуваються в інверторних зварювальних джерелах живлення; розробці математичних моделей, алгоритмів управління та спеціалізованого програмного забезпечення систем управління інверторними зварювальними джерелами; розробці спеціального вимірювального обладнання та програмного забезпечення обробки даних. Здобувачеві належать основні ідеї дисертаційної роботи, а також загальні

висновки та результати роботи.

У наведених роботах автору належить таке: [1 – 4, 6, 9, 15, 18, 19, 24 – 28, 38, 41 – 43, 46, 47] – розробка, теоретичний опис, математичне моделювання і експериментальні випробування інверторних джерел живлення для дугового зварювання; [5, 7] – основні ідеї та їх опис і реалізація; [8, 12, 13, 14, 16, 33] – експериментальні випробування джерел живлення машин контактного зварювання та аналіз результатів; [10, 20] – огляд способів виявлення аварійних режимів інтелектуальних електричних мереж; [11, 29, 31, 32, 36, 37, 39, 40, 44, 48] – основні ідеї, теоретичне обґрунтування, чисельні експерименти; [17] – ідея, розробка і створення універсального пристрою стабілізації горіння дуги; [21 – 23] – математичні моделі систем управління; [30, 35] – модель розподілу струму при зварюванні в CO<sub>2</sub> та підходи до керування процесом переносу електродного металу; [34] – огляд способів управління безпосередніми перетворювачами; [45] – створення моделі розподілу струму на вильоті стрічкового електрода, аналіз можливості одночасного існування декількох дуг з урахуванням характеристик джерела живлення.

**Апробація роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: міжнародній науково-технічній конференції «Университетская наука» (Маріуполь, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017); 6-й, 7-й, 8-й, 9-й, 10-й міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014); міжнародній науково-технічній конференції молодих учених «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2010); I Міжнародній конференції молодих спеціалістів «МЕТИНВЕСТ-2011» (Маріуполь, 2011); III міжнародній науково-методичній конференції «Современные проблемы сварки и родственных технологий, совершенствование подготовки кадров» (Маріуполь, 2011); VI, VII науково-практичній конференції “Донбас-2020: Перспективи розвитку очима молодих вчених” (Донецьк, 2012, 2014); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених з міжнародною участю «Автоматика та електротехніка» (Миколаїв, 2012); II міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Чернівці, 2012); II Всеукраїнській науково-технічній конференції «Зварювання та споріднені процеси і технології» (Миколаїв, 2012); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропривод» (Краматорськ, 2012); II Міжотраслевій науково-практичній конференції «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды» (Харків, 2013); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Енергетика, енергозбереження» (Маріуполь, 2013); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (Кременчук, 2013); Всеукраїнській науковій інтернет-конференції «Сучасна наука – інструмент динамічного розвитку економіки України» (Тернопіль, 2013); VII, VIII науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів «Сварка и родственные технологии» (Київ, 2013, 2015); 17-м Міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в

XXI веке» (Харків, 2013); I Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів» (Донецьк, 2013); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Енергетика, енергозбереження на початку XXI століття» (Маріуполь, 2014); V Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (Луцьк, 2014); Науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Научные исследования молодежи – инновации в науке и практике» (Маріуполь, 2013); III Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» (Миколаїв, 2014); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (Маріуполь, 2015, 2016, 2017); XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2016); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Сварка и родственные технологии: перспективы развития» (Краматорськ, 2016).

**Публікації.** Основний зміст роботи представлено в 94 науково-технічних роботах, в тому числі: 3 монографії, 45 статей в спеціалізованих наукових виданнях, з яких 8 статей в міжнародних і наукометричних виданнях (Scopus), 34 статей в збірниках ВАК, 3 статті в інших наукових виданнях. Новизна розробок підтверджена 46 патентами України (44 патенти на винаходи і 2 патента на корисні моделі).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, 7 розділів, висновків, списку першоджерел (313 посилань), додатків. Загальний обсяг дисертації складає 333 с.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи і визначено основні задачі досліджень. Описано об'єкт і методи досліджень, визначена наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, обґрунтовано достовірність результатів роботи, відображено особистий внесок автора, наведено відомості про апробацію роботи.

**В першому розділі роботи** проведено літературний огляд питань впливу зварювального обладнання на електричну мережу, проаналізовано вимоги сучасних стандартів електромагнітної сумісності. Виконано огляд побудови силової частини зварювального обладнання, розкрито причини невідповідності більшості зварювального обладнання вимогам стандартів. Проведено огляд існуючих шляхів і технічних рішень, які забезпечують усунення гармонік вхідного струму зварювальних джерел.

**В другому розділі роботи** описані методики і обладнання для проведення досліджень, проектування, виготовлення, налагодження та вимірювання енергетичних параметрів розробленого обладнання. Автором спроектований і виготовлений комплекс електронного обладнання, що забезпечує: 1) вимірювання напруг, струмів, потужностей як в зварювальних колах, так і в мережі, а також параметрів якості електроенергії; 2) імітацію живлення розроблених джерел від одно- або трифазної мережі з контрольованою формою



напруги і заданим повним опором; 3) запис осцилограм процесів для подальшої обробки, у т.ч. з використанням розробленого програмного забезпечення.

При випробуваннях зварювальних джерел живлення, описаних в роботі, для оцінки параметрів їх споживаного струму автором розроблений широкосмуговий вимірювач параметрів якості електроенергії, адаптований до лабораторних умов. Пристрій (рис. 1) виконано на основі однокристального мікроконтролера ATMEGA168, розроблене програмне забезпечення реалізує обчислення наступних параметрів: середньоквадратична напруга; середньоквадратичний струм; активна, реактивна і повна потужність; коефіцієнт потужності;  $\cos \phi$  по першій гармоніці; частота; активна потужність, що переноситься на першій гармоніці; напруга і струм першої гармоніки; коефіцієнт гармонік напруги і струму; коефіцієнт амплітуди напруги і струму.

Відображення результатів проводиться на текстовому рідкокристалічному індикаторі  $16 \times 2$  символи типу WH1602B-TMI-CT. Живиться аналізатор параметрів електроенергії від мережі 220 В.

Пристрій має можливість підключення до ПК за допомогою інтерфейсу RS-232 або USB (через перехідник). Програмне забезпечення дозволяє відображати осцилограми і спектральний склад напруги і струму, виконувати побудову векторних діаграм за основною частотою і вищим гармонікам, зберігати дані осцилограм в файл формату .PRN, який може бути імпортований в пакет MathCad.



*Рис. 1. Лабораторний вимірювач параметрів якості електроенергії*

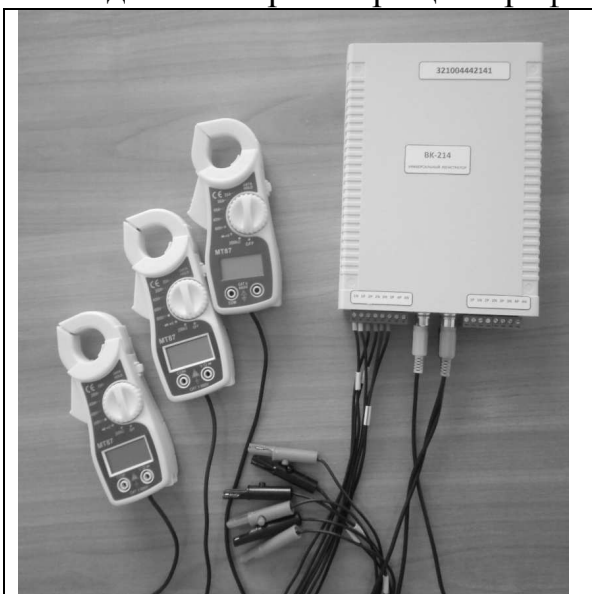
При проведенні досліджень зварювальних процесів виникає необхідність тривалого осцилографування напруг і струмів для їх подальшої обробки та аналізу. Для вирішення цього завдання автором розроблено програмно-апаратний комплекс реєстрації електричних величин (рис. 2). Пристрій має 4 входи напруги з межею вимірювання 280 В (діюча, синусоїдальна), 4 входи струму з межею 10 А (діюче, синусоїда), 4 ізольованих універсальних дискретних входи (24 ... 220 В, постійна/змінна напруга). Частота вибірок по кожному входу становить

60 кГц з подальшою децимацією до 10 кГц за допомогою sinc-фільтра, роздільна здатність 12 біт.

Дані в реальному часі передаються по Full Speed USB (механізм віртуального COM порту, реалізований на мікросхемі FT232RL) в ПК для збереження і подальшої обробки. Потік даних від реєстратора становить понад 128 кБ/с. Пристрій має годинник реального часу, що необхідний для фіксації часу появи умови початку запису, а також дозволяє проводити запис осцилограм в заданий час без участі оператора на SD карту пам'яті.

Оригінальним є схемне рішення струмових каналів. Вимірювання струму здійснюється спеціально доробленими струмовими кліщами МТ-87. Для зменшення фазової помилки і лінеаризації характеристики кліщі навантажені на конвертор негативного опору. Це дає зменшення фазової помилки до

приблизно 2 електричних градусів (без компенсації – понад 17 ел. градусів) на частоті 50 Гц. Крім цього, додатково виконана цифрова корекція АФЧХ струмових кліщів. Такий комплексний підхід дозволяє знизити фазову помилку струмових каналів до величин близько 0,19 електричних градусів, що знаходиться на рівні кращих професійних пристроїв.



*Рис. 2. Зовнішній вигляд апаратної частини комплексу реєстрації*

Живлення реєстратора здійснюється від шини USB, що значно полегшує його застосування на об'єкті дослідження. Для роботи з реєстратором розроблено спеціальне програмне забезпечення, що дозволяє зберігати дані осцилографування в файл (при цьому час запису визначається лише вільним місцем на жорсткому диску комп'ютера), виконувати обчислення середньоквадратичних значень напруг, струмів; розраховувати активну, реактивну, повну потужності; проводити спектральний аналіз напруг і струмів. Є можливість експорту даних осцилограм в пакет MathCad для подальшої обробки і візуалізації.

Для вирішення завдань запису електричних параметрів автором також розроблено програмно-апаратний комплекс, що складається з реєстратора (рис. 3) і спеціалізованого програмного забезпечення для ПК. Реєстратор має 10 аналогових каналів з гальванічною розв'язкою і межами вимірювання, що перемикаються ( $\pm 400$  мВ /  $\pm 200$  В /  $\pm 400$  В). Частота вибірок по кожному входу становить 30 кГц, роздільна здатність 12 біт.

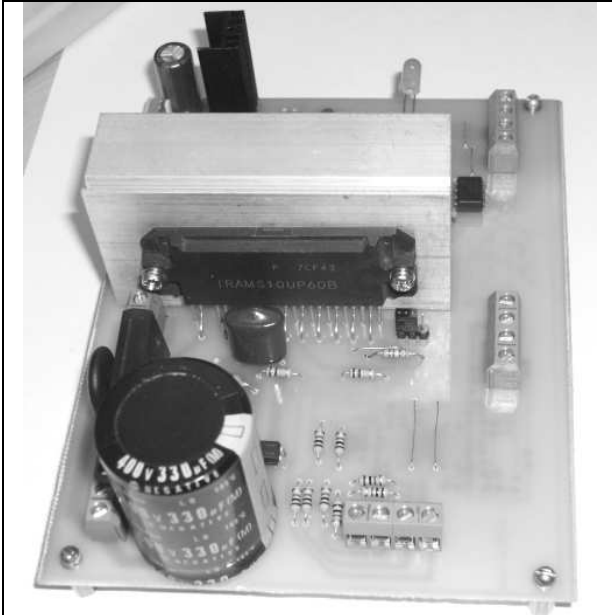
Дані в реальному часі передаються по Full Speed USB порту в персональний комп'ютер для збереження і подальшої обробки. Потік даних від реєстратора становить понад 600 кБ/с. Габарити пристрою  $140 \times 150 \times 50$  мм, живлення здійснюється від шини USB для підвищення зручності його застосування на об'єкті дослідження. Можливе живлення від зовнішнього джерела постійної напруги величиною (7 ... 12) В з вихідним струмом не менше 0,5 А.



*Рис. 3. Зовнішній вигляд 10-канального реєстратора*

Для оцінки впливу зварювальних джерел живлення на мережу, а також для дослідження впливу параметрів мережі живлення і параметрів якості електроенергії на ці джерела автором розроблений модуль (рис. 4), що дозволяє сформувати одно- або трифазну напругу із заданими параметрами (амплітудою, формою, частотою). Модуль виконаний на основі 32-бітного однокристального мікроконтролера з

ядром Cortex-M3 STM32F103C8T6B і силового 6-транзисторного моста автономного інвертора напруги. Реалізовано 4 канали вимірювання струму і 4 канали вимірювання напруги. Вимірюється також температура силових ключів і напруга ланки постійного струму. Є апаратний захист від перевищення вихідного струму, що працює незалежно від мікроконтролера. Це дозволяє зберегти працездатність силової частини в разі некоректної роботи керуючої програми. Передбачено 2 високошвидкісних послідовних порта з гальванічною розв'язкою для обміну даними між модулями і/або між модулем і ПК.



*Рис. 4. Модуль формування трифазної системи напруг*



*Рис. 5. Модуль безконтактної комутації навантаження (плата управління)*

Модуль призначений для роботи в однофазній або трифазній трипровідній мережі і дозволяє моделювати:

1) джерело живлення з довільною формою і частотою вихідної напруги і керованим вихідним опором;

2) активний випрямляч з прямим управлінням вхідними струмами;

3) навантаження, в т.ч. нестационарне і нелінійне, з програмним визначенням законів управління;

4) паралельний активний фільтр як із замкнутим, так і з розімкнутим контуром управління.

Для оцінки динамічних властивостей джерел живлення розроблений електронний модуль безконтактної комутації активного навантаження (баластних резисторів), що дозволяє з високою швидкістю змінювати опір навантаження випробовуваного джерела (час комутації не перевищує 2 мкс). Основою модуля є силовий IGBT ключ із схемою захисту від перенапруг при відключенні. Схема керування ним (рис. 5) виконана на мікроконтролері ATTINY13A і дозволяє регулювати частоту імпульсів в межах 0,25 ... 0,97 Гц і скважність в діапазоні 0 ... 100 %.

**В третьому розділі роботи** проведено дослідження шляхів

підвищення енергоефективності зварювальних джерел живлення. Описано експерименти з визначення параметрів якості споживаного струму зварювальних джерел живлення з низькочастотними трансформаторами та зварювальних інверторів. Описано проведені експерименти з оцінки динамічних характеристик зварювальних джерел живлення, виконаних за різними технологіями (трансформаторних низькочастотних і інверторних).

Зварювальні джерела живлення постійного струму з низькочастотними трансформаторами мають в своєму складі діодний або тиристорний випрямляч. Регулювання зварювального струму може здійснюватися перемиканням відводів первинної обмотки трансформатора (ВДГ-302, КИГ-401, КИГ-601 і ін.), зміною індуктивного опору трансформатора (для джерел з однофазним живленням, наприклад, ТДЭ-250, ТДМ-259, КИ009-315, КИ002-500 і ін.), або за рахунок системи фазоімпульсного управління тиристорним випрямлячем (ВДУ-504, ВДУ-506, КИУ-501, КИУ-1201 та ін.). Існує також ряд джерел (наприклад, ВДУ-1604 та ін.), в яких регулювання здійснюється тиристорним регулятором змінної напруги, включеним в ланцюг первинної обмотки зварювального трансформатора.

Всі без винятку вищеперелічені способи регулювання, а також наявність випрямляча, погіршують коефіцієнт потужності (КП) зварювальних джерел живлення. Так, регулювання за рахунок зміни реактивного опору веде до збільшення споживання реактивної потужності джерелом. Наявність діодного або тиристорного випрямляча веде до появи вищих гармонік в мережевому струмі, а регулювання за рахунок зміни кута комутації тиристорів – до зміни як споживаної реактивної потужності, так і спектру гармонік струму, споживаного джерелом з мережі.

Для оцінки енергетичних характеристик виконано осцилографування напруги мережі і вихідної напруги джерела, а також споживаного і вихідного струму зварювального джерела живлення ВДГ-302. Його відмінною рисою є наявність діодного випрямляча на виході і регулювання вихідних параметрів джерела за рахунок зміни коефіцієнта трансформації силового трансформатора. З цієї причини ВДГ-302 має менший коефіцієнт гармонік струму мережі, ніж джерела з тиристорним регулюванням, і меншу споживану реактивну потужність, ніж джерела із змінним розсіюванням зварювального трансформатора. Так, на рис. 6 приведена осцилограма фазної напруги і струму ВДГ-302 при навантаженні його на баластний реостат (вихідний струм близько 150 А, споживана потужність 5,4 кВт).

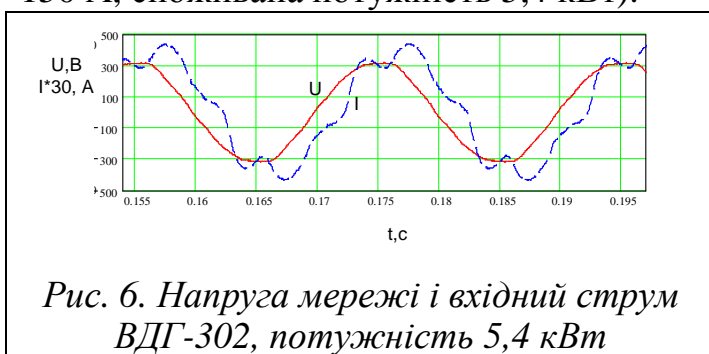


Рис. 6. Напруга мережі і вхідний струм ВДГ-302, потужність 5,4 кВт

Форма кривої споживаного джерелом струму дещо відрізняється від синусоїдальної (тобто містить вищі гармоніки) і зсунута по фазі по відношенню до напруги мережі. Причому характер фазового зсуву – відставання струму від напруги. Тобто розглянуте зварювальне джерело є

споживачем реактивної потужності. КП ВДГ-302 в цьому режимі складає 0,822, а  $\cos \varphi$  по першій гармоніці дорівнює 0,838. Коефіцієнт гармонік (THD, Total Harmonic Distortion) споживаного струму становить 4 %.

У джерелах на основі зварювального трансформатора з підвищеним розсіюванням і/або тиристорним регулюванням зазначені енергетичні показники будуть гіршими. Так, на рис. 7 представлені осцилограми фазної напруги мережі і споживаного струму джерела ВДУ-504 при потужності 14,3 кВт.

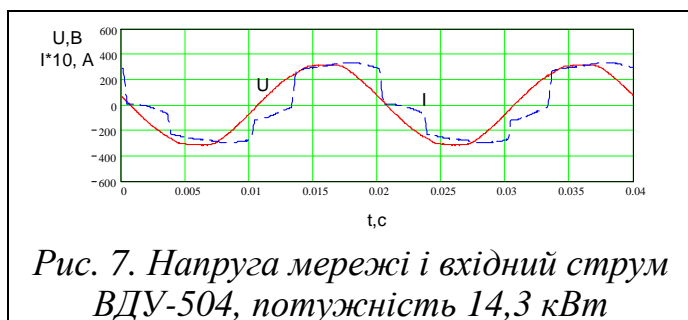


Рис. 7. Напряга мережі і вхідний струм ВДУ-504, потужність 14,3 кВт

Вимірний КП зварювального джерела живлення ВДУ-504 склав 0,8 при потужності 6 кВт і 0,87 при потужності 14,3 кВт. Були також проведені вимірювання показників якості електроенергії при роботі зварювального джерела ТДЭ-250 з навантаженням у вигляді баластного

реостата. КП джерела ТДЭ-250 змінювався від 0,361 (потужність 1,7 кВт) до 0,692 (7 кВт) при THD струму від 13 % (1,7 кВт) до 31 % (7 кВт).

Загальним для всіх розглянутих зварювальних джерел є мінливість фазового зсуву (реактивної потужності) і спектрального складу (потужність спотворень) споживаного від мережі струму.

КП зварювальних джерел має залежність від параметрів навантаження джерела, від встановленого режиму роботи, від параметрів мережі – симетрії напруг живлення, повного опору фаз мережі.

Зіставивши результати аналізу параметрів споживаного струму зварювальних джерел живлення з вимогами стандартів електромагнітної сумісності, що обмежують емісію вищих гармонік струму технічними засобами (ДСТУ ІЕС 61000-3-2: 2004, ДСТУ EN 61000-3-12: 2014, ДСТУ ІЕС 60974-10:2007), можна зробити висновок, що джерела з низькочастотними трансформаторами (ВДГ-302, ВДУ-504, ТДЭ-250) відповідають цим стандартам тільки в певному діапазоні режимів і при роботі в мережі з потужністю короткого замикання, що як мінімум на 2 порядки перевищує потужність джерела. При цьому ці джерела є споживачами реактивної потужності, що вимагає застосування компенсуючих пристроїв.

З метою підвищення ККД і поліпшення масогабаритних параметрів зварювальних джерел живлення використовується перетворення енергії на високій частоті шляхом застосування інверторів. Незважаючи на очевидні переваги інверторних джерел по масогабаритним характеристикам і ККД, розробниками приділяється недостатня увага проблемам підвищення їх коефіцієнта потужності. На рис. 8 наведені осцилограми напруги мережі і споживаного струму однофазного інверторного джерела SELMA ARC-160 при споживаній потужності 3 кВт.

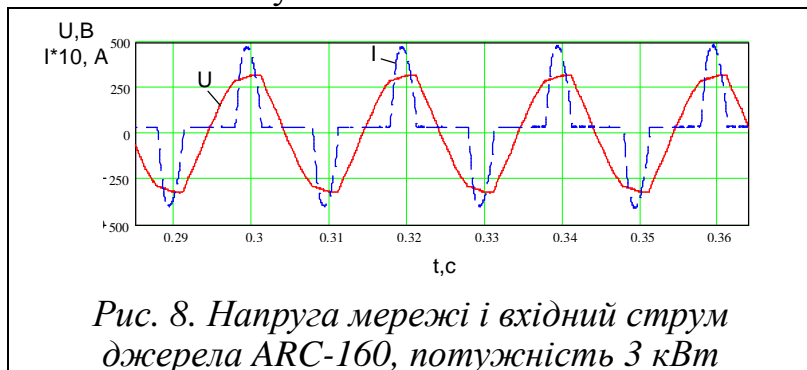


Рис. 8. Напряга мережі і вхідний струм джерела ARC-160, потужність 3 кВт

КП зварювального джерела ARC-160 змінюється від 0,652 (1,1 кВт) до 0,702 (3 кВт), а  $\cos \varphi$  по першій гармоніці – від 0,992 (1,1 кВт) до 0,998 (3 кВт). Низький КП інверторних джерел пояснюється високим

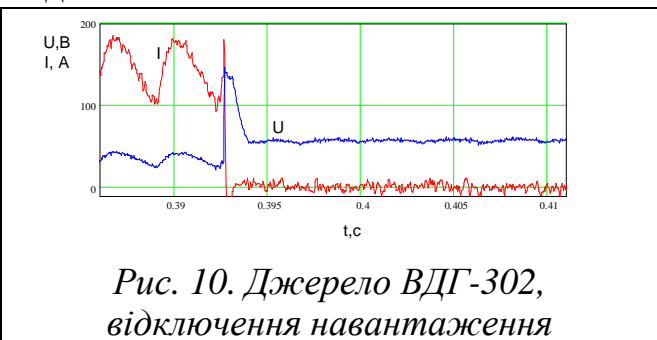
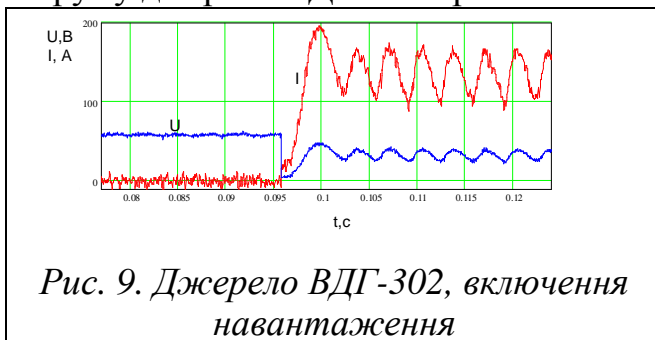
вмістом гармонік в споживаному струмі (THD більше 100 %). Це призводить до підвищення втрат електроенергії в мережі (ці втрати в першому наближенні залежать від квадрату істинного КП), перевантаження мережевого обладнання, спотворення форми напруги. Високий THD споживаного струму розглянутого

інверторного зварювального джерела пояснюється будовою його силової частини, а саме – схемою перетворювача змінної напруги в постійну. В даному випадку цей перетворювач являє собою однофазний діодний міст зі згладжуючим конденсатором великої ємності (близько 2000 мкФ) на виході. Більшість інверторних зварювальних джерел, що випускаються в даний час, не мають коректорів коефіцієнта потужності (ККП) і не задовольняють вимогам стандартів електромагнітної сумісності технічних засобів (ДСТУ ІЕС 61000-3-2: 2004, ДСТУ EN 61000-3-12: 2014) у всьому можливому діапазоні режимів роботи.

Для приведення параметрів споживаного струму до норм стандартів потрібне встановлення фільтрів вищих гармонік струму. Компенсація реактивної потужності для інверторних джерел не потрібна.

Великий вплив на умови (стабільність) горіння дуги мають динамічні характеристики джерела живлення, тобто його реакція на швидкі зміни потужності навантаження (дуги).

Автором виконана оцінка динамічних властивостей зварювальних джерел за осцилограмою вихідного струму і напруги при стрибкоподібному включенні/відключенні активного навантаження (баластного реостата). Комутація реостата в експериментах здійснювалася транзисторним ключем, описаним в розділі 2. На рис. 9, 10 наведені осцилограми вихідних напруги та струму джерела ВДГ-302 при включенні/відключенні навантаження.



Видно, що при включенні навантаження вихідна напруга джерела падає практично до нуля, потім починається зростання струму. Швидкість зміни струму обмежена вихідним дроселем джерела. Ясно видно пульсації з 6-кратною частотою мережі, що пояснюються роботою мостового трифазного діодного випрямляча. Наявність пульсацій характерна для всіх джерел, що мають в своєму складі керований або некерований випрямляч.

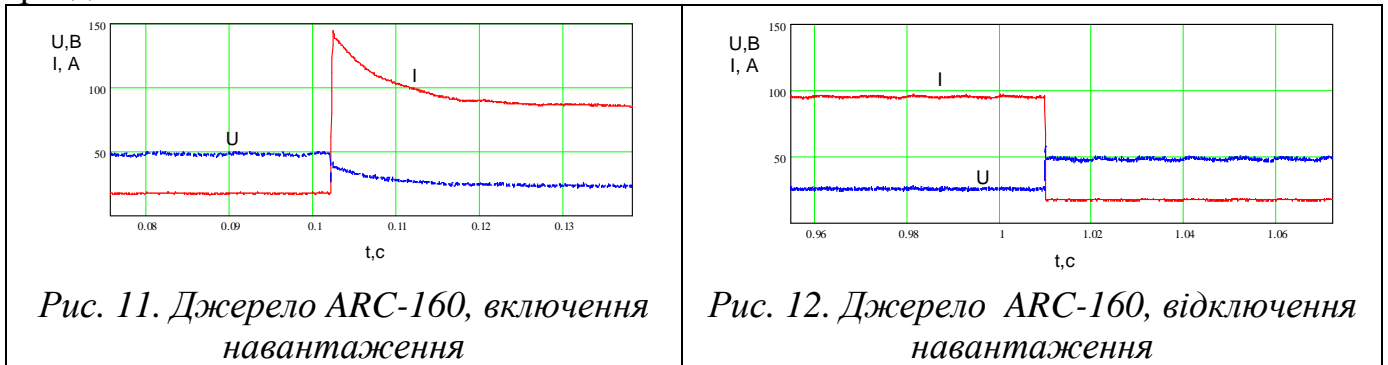
Слід зазначити, що велика амплітуда пульсацій зварювального струму несприятливо позначається на надійності роботи напівпровідникових компонентів випрямляча і точності підтримки вихідних параметрів – напруги або струму. Знизити амплітуду пульсацій струму можна, збільшивши індуктивність вихідного дроселя, але це призводить до зменшення швидкості реакції джерела на зміну навантаження і порушення процесу перенесення електродного металу при MIG, MMA процесах. Ця обставина ускладнює створення універсальних зварювальних джерел живлення з перетворенням енергії на низькій (мережевий) частоті.

При відключенні навантаження видно викид ЕРС самоіндукції вихідного дроселя джерела. Через це напруга на виході перевищує 140 В протягом близько 1 мс. Слід зазначити, що обмеження напруги викликано роботою схеми



захисту транзисторного комутатора, в процесі зварювання амплітуда імпульсу може бути більше. Ця обставина визначає хорошу стабільність горіння дуги, тому що в разі її обриву міжелектродний проміжок виявиться повторно пробитий за рахунок енергії, запасеної в вихідному дроселі.

На рис. 11, 12 приведені осцилограми вихідної напруги і струму інверторного зварювального джерела ARC-160 при включенні/відключенні баластного реостата за допомогою електронного комутатора, описаного в розділі 2.



При підключенні навантаження вихідний струм джерела практично відразу збільшується до максимального струму КЗ, а потім спостерігається аперіодичний перехідний процес в контурі регулювання струму. Час регулювання становить приблизно 15 мс. Таким чином, з цим джерелом підпал дуги буде «жорстким», з максимальним струмом, що не завжди сприятливо позначається на якості зварювання, особливо при TIG процесі. Слід зазначити, що така поведінка регулятора струму характерно для інверторних джерел, виконаних за мостовою схемою.

Джерела на основі прямоходового перетворювача (т.зв. «косий міст») з струмовим керуванням мають час встановлення вихідного струму не більше одного періоду перемикання силових транзисторів.

При відключенні навантаження вихідна напруга інверторного джерела не має викидів, тому що індуктивність вихідного дроселя занадто мала для істотного впливу на процес. Це означає, що стабільність горіння дуги при зварюванні з використанням інверторного джерела буде гірше, оскільки в разі обриву дуги напруга холостого ходу інверторного джерела (трохи більше 50 В) може бути недостатньо для повторного пробію міжелектродного проміжку.

На основі літературного огляду і проведених досліджень визначені шляхи удосконалення існуючих та розробки нових методів та засобів стабілізації горіння зварювальної дуги; розробки нових схемних рішень зварювальних джерел з підвищеною якістю споживаного струму; розробки нових підходів до підвищення енергоефективності комплексів зварювального обладнання; створення технічних рішень зварювальних джерел з покращеними масогабаритними показниками:

1) розробка зварювальних джерел живлення з активними ККП, що мають поліпшені характеристики по енергоефективності та швидкодії;

2) відхід від подвійного перетворення енергії і розробка зварювальних джерел прямого перетворення, що мають високий КП і характеризуються відсутністю ємнісного накопичувача енергії;

3) розробка джерел з функціями паралельного активного фільтра, які частково нейтралізують негативний вплив на мережу випущених раніше джерел без ККП (зменшення THD мережевого струму і напруги, в т.ч. компенсація реактивної потужності);

4) розробка джерел з частковою корекцією коефіцієнта потужності (відсутність ККП в явному вигляді, менші втрати енергії в порівнянні з ККП);

5) модифікація існуючого обладнання шляхом розробки блоків управління процесом зварювання, які працюють з низькочастотними трансформаторами і дозволяють забезпечити ефективне формування вихідних характеристик джерела з одночасним підвищенням його КПД;

б) розробка універсальних пристроїв підпалу і стабілізації горіння дуги, сумісних як з традиційними низькочастотними, так і з сучасними інверторними зварювальними джерелами живлення.

**В четвертому розділі роботи** йдеться про розробку принципів створення енергоефективних зварювальних джерел живлення. В роботі отримали подальший розвиток два напрями: модифікація вхідних випрямлячів інверторних джерел з метою покращення їх енергетичних показників та розробка підходів, структур, схем, алгоритмів керування інверторними джерелами з безпосереднім перетворенням вхідної напруги в високочастотну з її подальшою трансформацією і випрямленням.

Запропоновано декілька схемних рішень вхідних випрямлячів для зварювальних інверторних джерел з підвищеним коефіцієнтом потужності. В першій частині розділу наведені схемні рішення і алгоритми управління випрямлячами з неповною корекцією коефіцієнта потужності – такі системи відрізняються меншою собівартістю.

Запропоновано цифрову систему управління активним коректором коефіцієнта потужності з підвищеною швидкістю регулятора вихідної напруги. Застосування такої системи у складі інверторного зварювального джерела дає можливість знизити ємність накопичуючих конденсаторів ланки постійного струму в зварювальних інверторах з ККП при збереженні високої якості формування струму мережі.

Автором розроблено вдосконалений варіант схеми випрямляча зі схемою т.зв. «електронного дроселя» зі стабілізованою вихідною напругою і розширеним робочим діапазоном вхідних напруг зварювального інверторного джерела живлення. Для цього інвертор «електронного дроселя» замінений одноквADRантним допоміжним вольтододатковим перетворювачем (рис. 13), який отримує живлення від вихідних шин випрямляча.

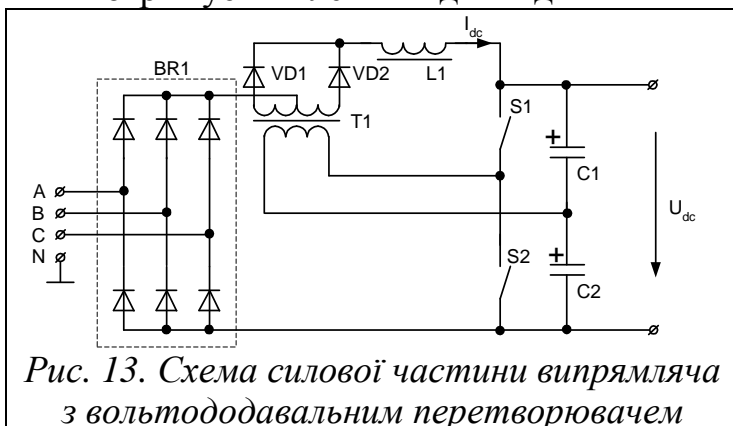


Рис. 13. Схема силової частини випрямляча з вольтододавальним перетворювачем

В результаті розроблена схема має те ж число силових транзисторів (два), що і оригінальна схема «електронного дроселя», при кращих споживчих якостях. Проведені розрахунки показують, що середня потужність допоміжного перетворювача становить лише



від  $1 - \frac{3}{\pi} = 0,047$  вихідної потужності випрямляча і збільшується в залежності від потрібного діапазону вхідних напруг, в якому необхідна підтримка стабільної вихідної напруги випрямляча. Максимальний КП випрямляча становить  $3/\pi = 0,955$ , а THD вхідних струмів – 31 %.

Автором розроблений підвищуючий трифазний активний випрямляч (рис. 14), що забезпечує роботу зі стабілізованою вихідною напругою і синусоїдальним вхідним струмом. Відмінною особливістю схеми є знижені вимоги до високочастотних силових ключів – максимальна напруга на них не перевищує половини вихідної напруги, а також є можливість формування двополярної вихідної напруги.

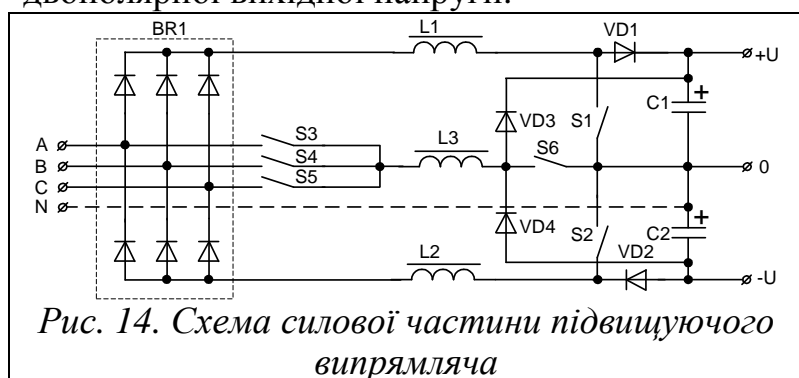


Рис. 14. Схема силової частини підвищуючого випрямляча

Струми дроселів L1, L2 можуть регулюватися шляхом зміни скважності відкриття ключів S1, S2 відповідно, оскільки елементи L1, S1, VD1, C1 і L2, S2, VD2, C2 утворюють два підвищуючих (boost) перетворювача. Завдяки наявності діодного моста

BR1 на вході перший перетворювач завжди працює з позитивною вхідною напругою, а другий – завжди з негативною. Це дозволяє зменшити число силових транзисторів в їх складі, спростити управління ними та зменшити втрати потужності.

Для підтримки близького до одиниці вхідного КП випрямляча необхідно забезпечити управління всіма трьома вхідними струмами. Для виконання цієї умови призначений третій підвищуючий перетворювач на елементах L3, S6, VD3, VD4, вхід якого за допомогою двонаправлених ключів S3, S4, S5 підключається до фази з мінімальним по абсолютній величині потенціалом, а вихід підключений до накопичувальних конденсаторів C1, C2. Ключ S6 повинен бути двонаправленим, оскільки знаки струму і напруги на ньому змінюються.

Зазначений активний випрямляч по відношенню до мережі живлення представляє собою симетричний лінійний активний опір і має близький до одиниці вхідний КП. Завдяки можливості роздільного управління вхідними струмами високий КП може бути збережений також і в умовах несиметричної напруги живлення або при наявності в ній вищих гармонік. Проведені розрахунки і чисельне моделювання показують, що при живленні від симетричної трифазної мережі потужність основних перетворювачів (з ключами S1, S2) становить по 47 % від вихідної потужності, а потужність допоміжного перетворювача (з ключем S6) – всього 6 % від вихідної.

При відсутності з'єднання з нейтраллю мережі можливо також скорочення числа силових компонентів за рахунок усунення одного з основних перетворювачів (наприклад, в негативному плечі). Схема випрямляча, яка отримана при цьому, показана на рис. 15.

Завдяки можливості прямого управління вхідними струмами, високий КП може бути збережений також і в умовах несиметричної мережі або при

наявності в ній вищих гармонік. Розрахунки показують, що при живленні від симетричної трифазної мережі 91 % вихідної потужності забезпечується основним перетворювачем (з ключем S1), а решта 9 % забезпечується напівмостовим перетворювачем з ключами S5, S6.

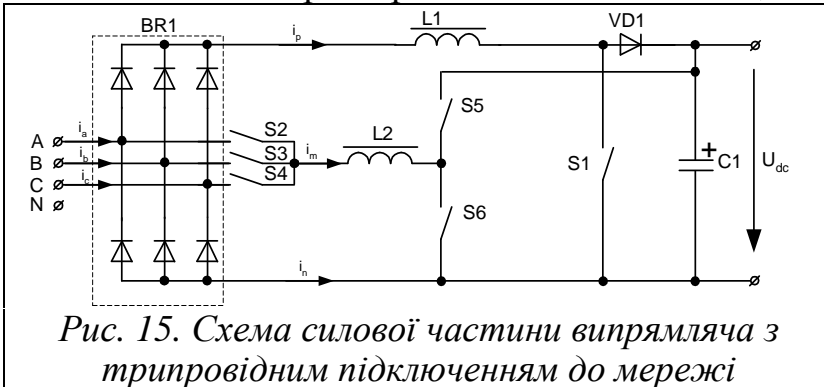


Рис. 15. Схема силової частини випрямляча з трипровідним підключенням до мережі

Розроблено варіант схеми гібридного підвищувача, в якому основний підвищувальний перетворювач виконаний вольтододавальною (рис. 16). Перевагою такої схеми є невелика потужність

перетворювачів: для вольтододавального (S6, S7, T1, VD1, VD2, L2) це всього близько 5 % вихідної потужності випрямляча; для додаткового (S1 – S5, L1) – близько 9 %.

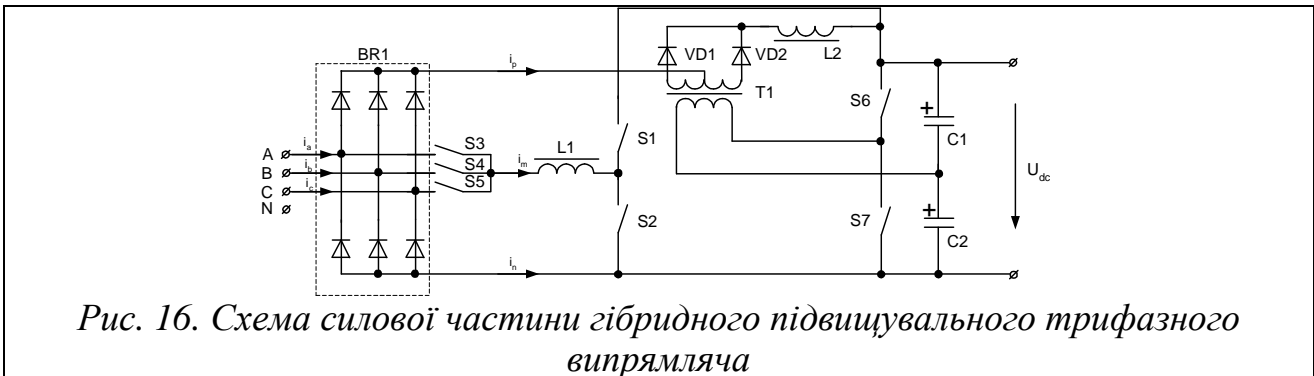


Рис. 16. Схема силової частини гібридного підвищувального трифазного випрямляча

На рис. 17 наведені фото експериментального зразка гібридного підвищувального трифазного випрямляча

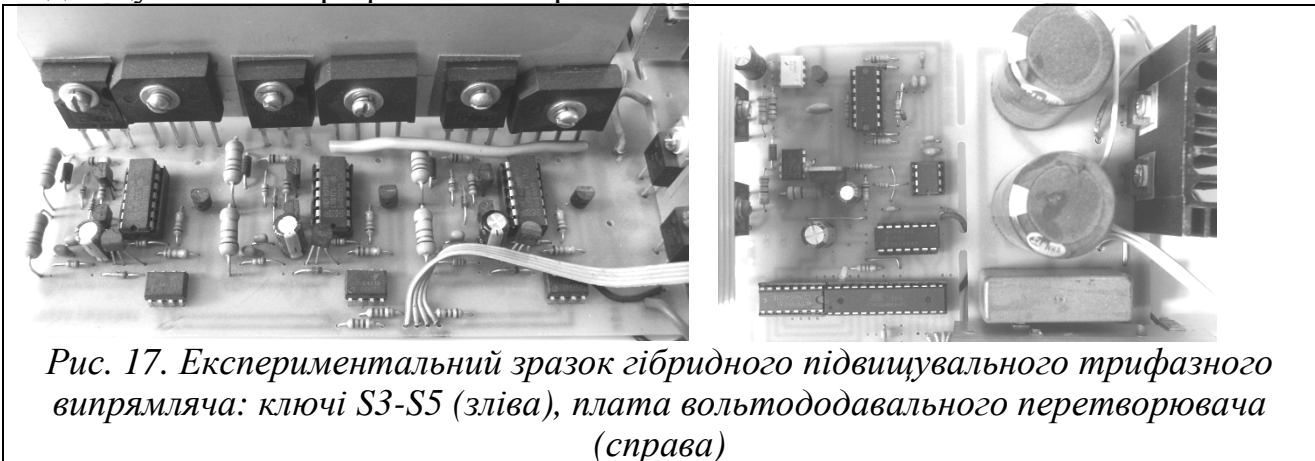


Рис. 17. Експериментальний зразок гібридного підвищувального трифазного випрямляча: ключі S3-S5 (зліва), плата вольтододавального перетворювача (справа)

Застосування описаних схем активних випрямлячів з корекцією КП дозволяє створювати нові електрозварювальні джерела живлення, що задовольняють сучасним стандартам електромагнітної сумісності технічних засобів і модернізувати існуючі інверторні джерела без корекції КП, забезпечивши високу якість споживаного ними струму і розширивши діапазон допустимих вхідних напруг живлення.

До загальних недоліків сучасних зварювальних інверторів слід віднести подвійне перетворення енергії і наявність високовольтного електролітичного

конденсатора великої ємності в ланцюзі постійного струму, що тягне за собою погіршення масогабаритних параметрів джерел і зниження надійності.

У зв'язку з цим актуальною є розробка зварювальних джерел живлення з безпосереднім перетворенням трифазної напруги живлення в високочастотну, що мають такий набір властивостей: підвищену ефективність перетворення за рахунок зменшення числа напівпровідникових елементів в силовому ланцюзі; близький до одиниці коефіцієнт потужності за рахунок активного управління формою вхідного струму; відсутність накопичувального конденсатора великої ємності за рахунок усунення ланки постійного струму.

Автором запропоновано декілька варіантів схем джерел прямого перетворення: з одним або декількома силовими високочастотними трансформаторами, з різним режимом роботи трансформаторів (двотактний, прямоходовий, зворотходовий) (рис. 18 – 20). Для кожної зі схем виконано математичний опис, отримані основні залежності і синтезовані системи управління, які забезпечують формування заданої форми вихідної ВАХ джерела і керування вхідними струмами з умов забезпечення близького до одиниці КП. Розроблені також методики розрахунку силових трансформаторів.

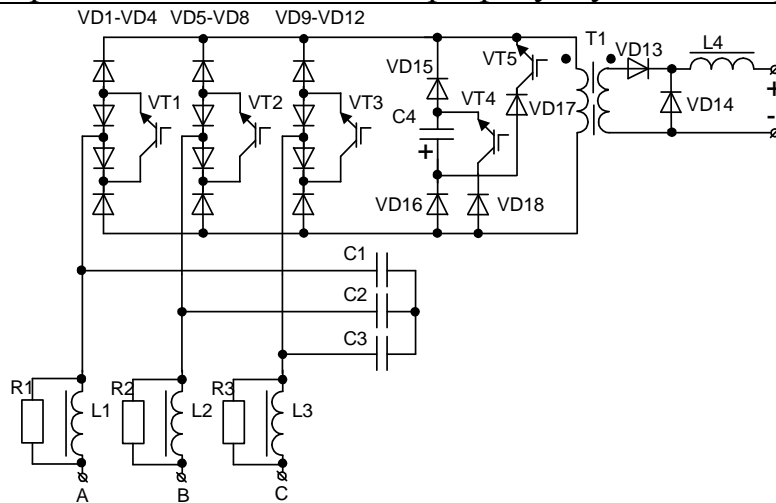


Рис. 18. Силова схема зварювального інвертора безпосереднього перетворення з прямоходовим режимом роботи трансформатора

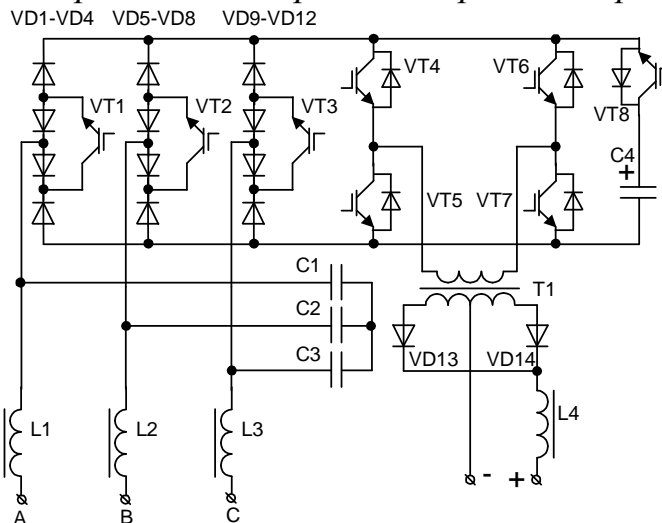
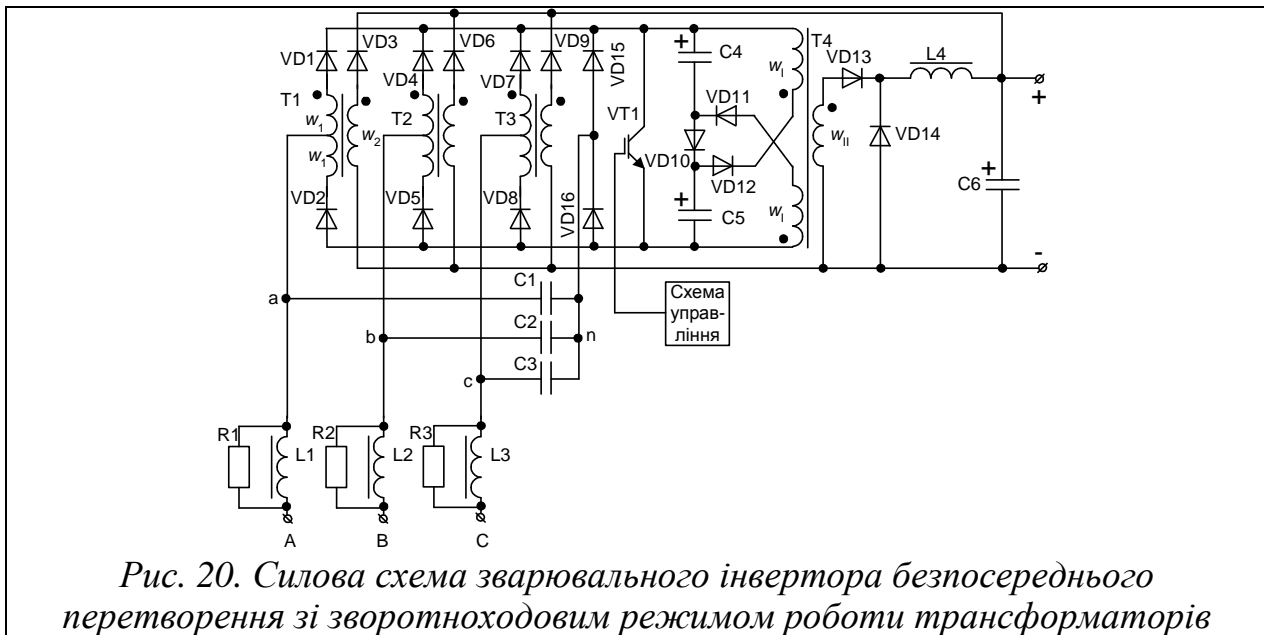
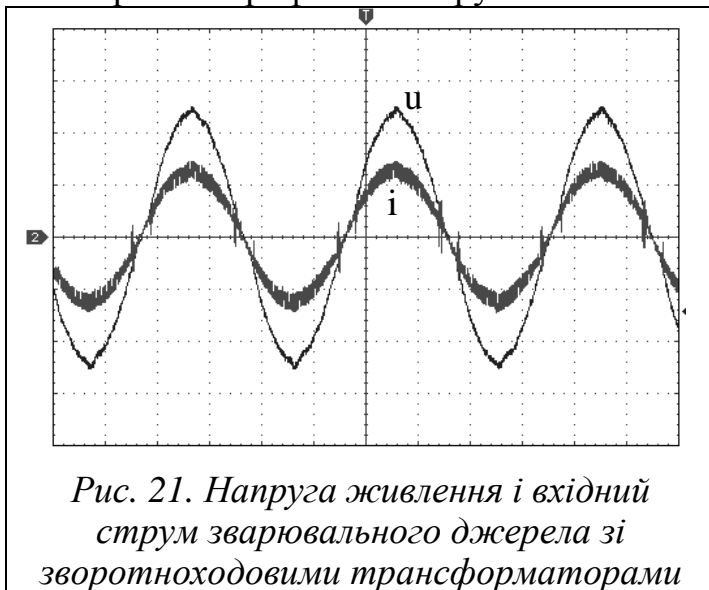


Рис. 19. Силова схема зварювального інвертора безпосереднього перетворення з двотактним режимом роботи трансформатора



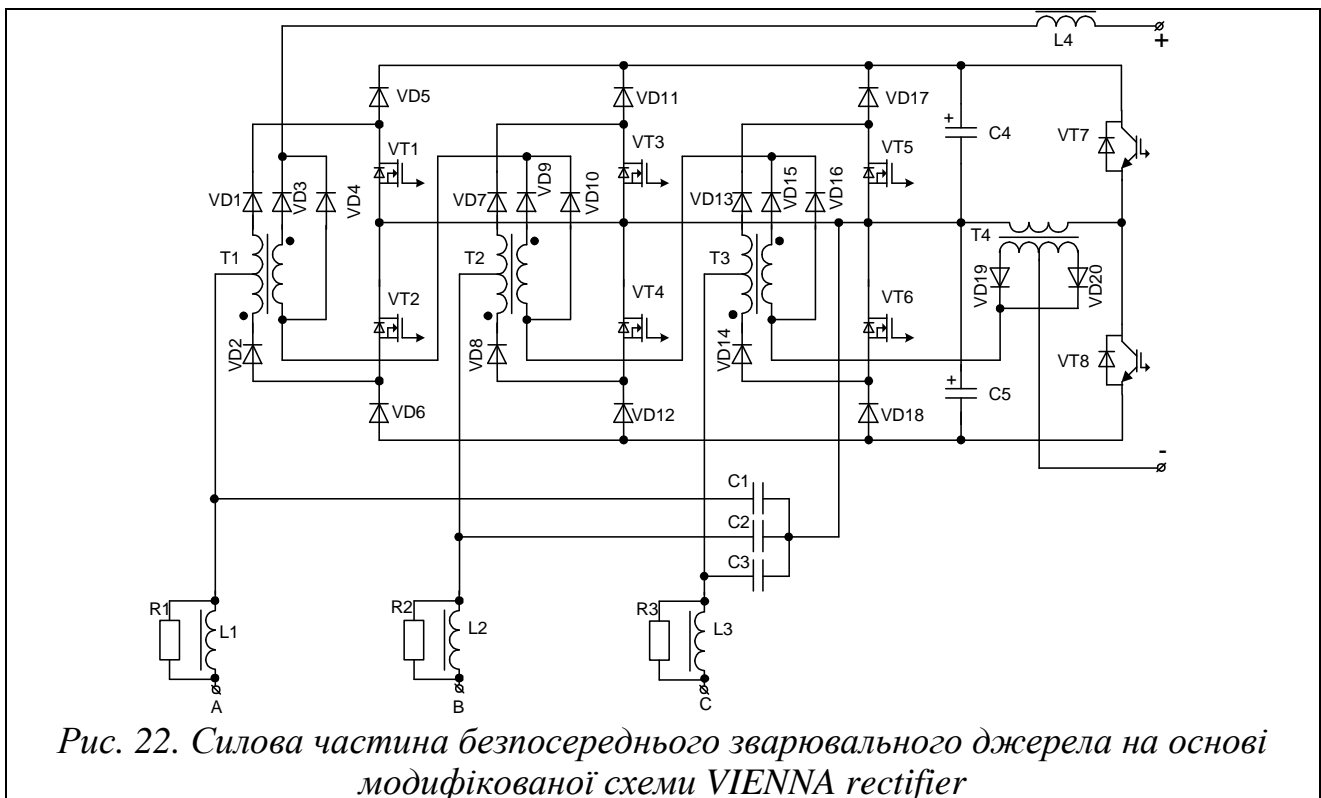
Варто відмітити, що джерело зі зворотноходовим режимом роботи трансформаторів містить всього один ключовий компонент в силовій частині, причому закон керування ним – робота з постійною скважністю, що значно спрощує апаратну реалізацію системи керування таким джерелом. На рис. 21 наведено осцилограму напруги і струму цього джерела при живленні від симетричної трифазної напруги.



В роботі отримав подальший розвиток напрям створення модульних джерел живлення. Причому модульність відноситься як до внутрішньої побудови джерела (закінчена силова схема в кожній фазі з паралельним чи послідовним з'єднанням виходів), так і до можливості роботи декількох джерел на спільне навантаження.

Запропоновано варіант зварювального джерела безпосереднього перетворення на основі схеми VIENNA rectifier,

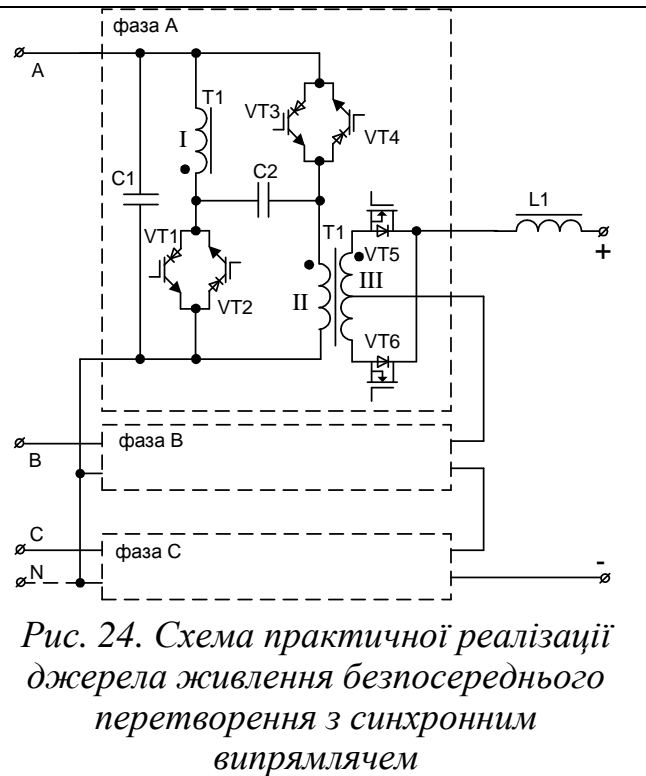
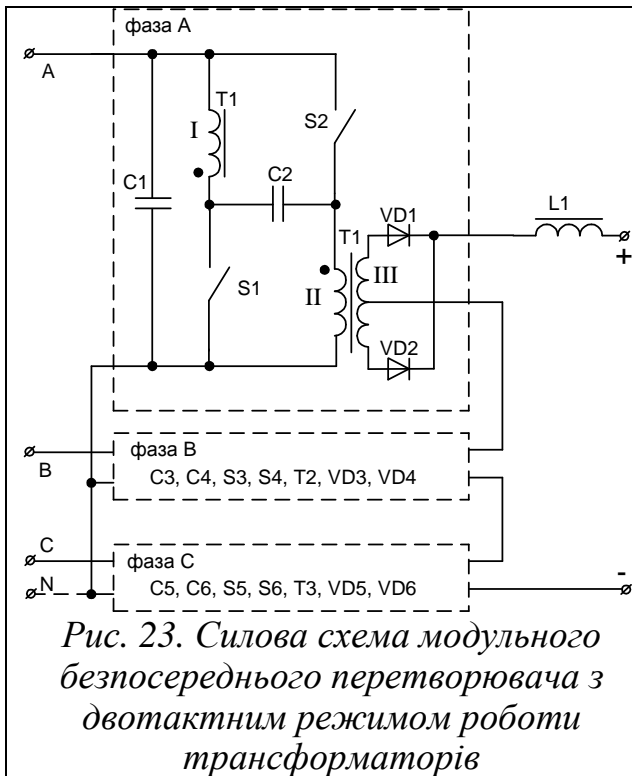
модифікованої для забезпечення гальванічної розв'язки вихідних ланцюгів від мережі за допомогою прямоходових трансформаторів (рис. 22). Завдяки послідовному з'єднанню вихідних випрямлячів така побудова джерела ефективна для реалізації плазмових процесів, які потребують підвищеної напруги на дузі. Джерело має модульну конструкцію, що полегшує його обслуговування. Крім того, таке джерело має здатність зберігати обмежену працездатність (з неповною потужністю) при виході з ладу одного з фазних модулів або при обриві фази мережі. Ще однією особливістю модульної побудови є мінімізація кількості силових ключових компонентів в силовому ланцюзі, що дозволяє підвищити ККД таких зварювальних джерел.



Недоліком джерел живлення на основі прямоходових перетворювачів є низьке використання магнітопроводів імпульсних трансформаторів через роботу з постійною складовою магнітного потоку.

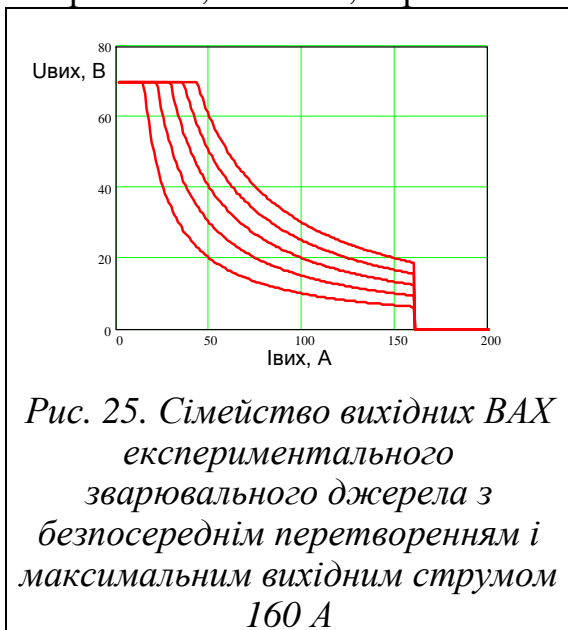
Поліпшити використання трансформаторів джерела живлення можна за рахунок застосування двотактного режиму роботи. Ця задача вирішена автором в модульному джерелі живлення, схематика силової частини якого показана на рис. 23. У кожній фазі джерела живлення встановлений високочастотний трансформатор, первинні обмотки якого включені таким чином, що струм намагнічування має різну полярність, в залежності від включеного ключа. Два конденсатора (C1, C2) призначені для обмеження перенапруг при перемиканні ключів. Вихідна обмотка трансформатора підключена до двонапівперіодного синхронного випрямляча (VD1, VD2). Виходи випрямлячів всіх фаз з'єднані згідно-послідовно і підключені до виходу джерела через згладжуючий дросель (L1).

На рис. 24 наведена схема практичної реалізації такого джерела живлення. Напівпровідникові силові ключі виконані з двох зустрічно-паралельно з'єднаних RB IGBT транзисторів, здатних витримувати зворотну напругу. Це рішення дозволяє звести кількість напівпровідникових елементів в силовому ланцюзі джерела до одного, тим самим підвищити ефективність перетворення енергії. Крім цього, для зниження втрат енергії на виході застосований синхронний випрямляч на MOSFET транзисторах з малим опором каналу. При відповідному виборі транзистора падіння напруги на опорі каналу може бути менше, ніж на зворотному діоді. Робота синхронного випрямляча полягає у відкритті польового транзистора в інверсному режимі, коли паралельно зворотному діоду підключається опір відкритого каналу. Це дозволяє знизити втрати потужності в синхронному випрямлячі в порівнянні з діодним.



В роботі виведені основні залежності для джерела, побудованого за такою схемою, синтезовані алгоритми управління.

У вищенаведених зварювальних джерел з трифазним живленням в вихідній напрузі відсутні компоненти з частотою мережі або її гармонік. Це спрощує вимоги до її фільтрації і дозволяє зменшити індуктивність вихідного дроселя. Також відмінною рисою джерел безпосереднього перетворення з високим КП є гіперболічна форма вихідної ВАХ, тобто робота в режимі з постійною активною потужністю (рис. 25). Ця особливість не чинить завад при зварюванні, навпаки, сприяє стабілізації тепловиділення під час зварювання.



В роботі розглянуто питання синтезу систем управління джерелами, які дозволяють отримувати вихідні ВАХ з необхідним кутом нахилу, у тому числі негативним (тобто вихідна ВАХ джерела є зростаючою).

Завдяки використанню в системах управління описаних інверторних зварювальних джерел живлення високопродуктивних мікроконтролерів при необхідності можлива реалізація і більш складних алгоритмів управління – наприклад, зварювання з накладенням імпульсів струму, зварювання з керованим переносом електродного металу і т.д.

Розроблено спосіб збільшення зварювального струму шляхом паралельного включення декількох джерел при забезпеченні пропорційного розподілу струмів між ними. При цьому виходи джерел з'єднуються згідно-паралельно, виділяється головне джерело, а решта

отримує роль ведених. Головне джерело може працювати з будь-якими законами управління, всі ведені працюють в режимі керованих джерел струму (з крутопадаючими ВАХ).

В процесі роботи проводиться вимірювання вихідного струму головного джерела ( $I_0$ ), а ведені джерела підтримують свої вихідні струми пропорційними вихідному струму головного (рис. 26), тобто вихідний струм веденого джерела з номером  $n$  дорівнює  $I_0 K_n$ . В результаті виходить складене джерело живлення

зі збільшеним вихідним струмом  $I_{вих} = I_0 \left( 1 + \sum_{i=1}^n K_i \right)$ .

Для забезпечення високої швидкості реакції на збурюючі впливи всі джерела повинні мати високу швидкодію, тому в якості ведених джерел доцільно використовувати інверторні.

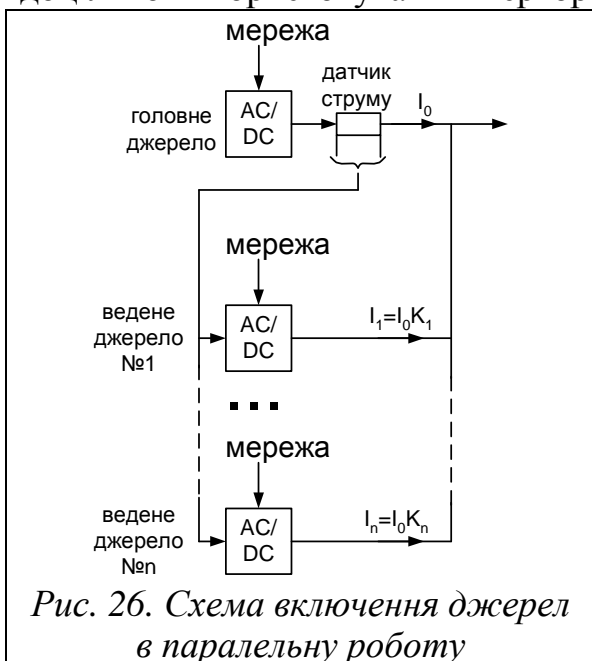


Рис. 26. Схема включення джерел в паралельну роботу

Організація паралельної роботи декількох інверторних джерел дає змогу забезпечити живлення процесів відносно великої потужності, наприклад, наплавлення стрічковим електродом. Крім того, це дає можливість набирати необхідну потужність джерела в залежності від технологічної задачі.

У п'ятому розділі роботи розроблені принципи створення інверторних джерел живлення з функціями поліпшення спектрального складу напруги мережі. Запропоновано оригінальний спосіб управління активним випрямлячем, який дозволяє обмежено інтегрувати в нього функції паралельного активного фільтра без датчиків струму, що дозволяє поліпшити спектральний склад напруги мережі живлення.

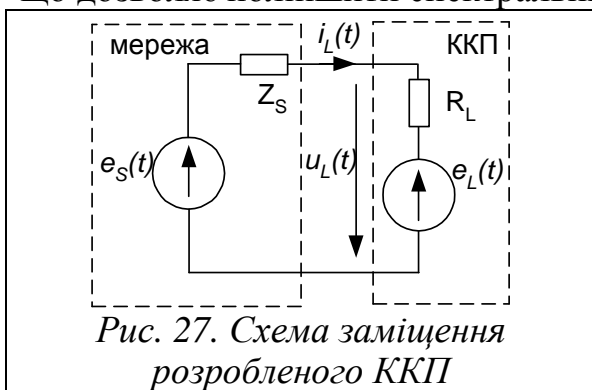


Рис. 27. Схема заміщення розробленого ККП

З цією метою формування вхідного струму ККП  $i_L(t)$  виконується у відповідності зі схемою заміщення, наведеною на рис. 27. ККП по відношенню до мережі поводить себе як активний опір  $R_L$ , але має власну фіктивну ЕРС  $e_L(t)$ , що містить в своєму спектрі тільки першу гармоніку частоти мережі живлення. Джерело напруги  $e_L(t)$  синхронізоване з мережею живлення за

допомогою петлі фазової автопідстройки частоти. Величина завдання амплітуди  $E_R$  обирається таким чином, щоб миттєва активна потужність ККП була завжди позитивною:  $i_L(t) \cdot u_L(t) > 0$ , що дозволяє використовувати розроблений метод управління для практично всіх існуючих топологій силової частини активних ККП з прямим управлінням вхідним струмом. Величина  $R_L(E_R, P)$  визначається з умови балансу потужності (необхідна умова стабілізації

вихідної напруги):  $\frac{\omega}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi/\omega} u_L(t) \frac{u_L(t) - e_L(t)}{R_L(E_R, P)} dt = P$ , де  $P$  – споживана від мережі потужність, Вт,  $\omega$  – кутова частота напруги мережі,  $s^{-1}$ . У порівнянні з «класичним» ККП величина  $R_L$  при тій же потужності буде менше. Таким чином, через зниження вхідного опору ККП буде надавати підвищену шунтуючу дію для струмів вищих гармонік, за аналогією з паралельним активним фільтром.

На рис. 28 показаний приклад ефекту від заміни «класичного» ККП на ККП з описаною системою управління. Заміна класичного ККП (рис. 28а) на ККП з розробленою автором системою управління (рис. 28б) призводить до підвищення загального коефіцієнта потужності:  $PF_2 > PF_1$ . Таким чином, коефіцієнт потужності системи «нелінійне навантаження + розроблений ККП» буде вище, ніж у системи «нелінійне навантаження + класичний ККП», незважаючи на те, що коефіцієнт потужності розробленого ККП буде помітно нижче одиниці. Ефект пояснюється тим, що у випадку, показаному на рис. 28б, частина вищих гармонік струму нелінійного навантаження замикається через ККП, а не через мережу живлення. У разі «чистої» мережі (при незначному рівні вищих гармонік напруги) робота розробленого ККП повністю аналогічна «класичному», тобто в спектрі вхідного струму буде присутня тільки перша гармоніка.

Розроблена система управління, що реалізує запропонований метод. Вона виконана у вигляді окремого блоку обробки напруги мережі і формування струму завдання, який може бути інтегрований в існуючі ККП.



Рис. 28. Застосування розробленого ККП в комплексі з нелінійним навантаженням:  $PF_2 > PF_1$

Для експериментального підтвердження працездатності запропонованого способу керування створено модифікований ККП на основі спеціалізованого контролера МС33262.

ККП працював спільно з нелінійним навантаженням, що представляє собою мостовий випрямляч зі згладжувальним конденсатором  $3 \times 470$  мкФ, навантажений на активний опір, і споживає потужність близько 1000 Вт при напрузі мережі 193 В. Потужність навантаження ККП становила 800 – 860 Вт.

На рис. 29 і 30 приведені осцилограми напруги і струму системи «нелінійне навантаження + ККП» при відключеній і включеній функції активної фільтрації відповідно. Для зручності представлення сигналів виконане нормування на амплітуду. Як видно з представлених осцилограм, включення функції активної фільтрації в ККП призвело до підвищення загального КП



системи с 0,937 до 0,962; зниження  $THD_I$  з 33 % до 26 % і зниження  $THD_U$  з 5,8 % до 5,2 %, що підтверджує працездатність описаного способу управління активним ККП. Зниження  $THD_U$  пояснюється збільшенням частки активної потужності, яка переноситься на частотах вищих гармонік за рахунок застосування запропонованого алгоритму керування. Ця частка потужності

може бути визначена як  $P_k^* = 1 - \frac{U_{1m}(U_{1m} - E_R)}{2R_L \cdot P}$ , де  $U_{1m}$  – амплітуда першої гармоніки напруги мережі, В;  $E_R$  – амплітуда фіктивної ЕРС. Для «класичного» ККП частка потужності, що переноситься вищими гармоніками, визначається

як  $1 - \frac{1}{1 + THD_U^2}$  і на практиці є на порядок нижче.

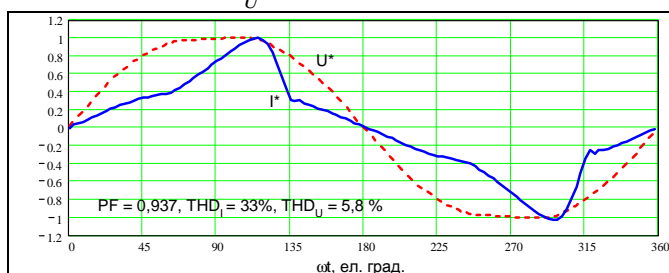


Рис. 29. ККП імітує активний опір

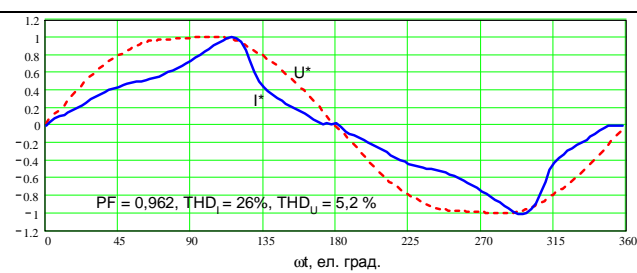


Рис. 30. ККП в режимі активної фільтрації

Спосіб може бути застосований для практично всіх відомих топологій активних випрямлячів, в яких реалізовано пряме управління вхідним струмом. При застосуванні розробленої системи управління для 3-фазних активних випрямлячів, а також для джерел живлення з безпосереднім перетворенням, в яких є можливість прямого управління лінійними струмами.

Застосування зварювальних джерел з функціями поліпшення спектрального складу напруги мережі дозволить забезпечити дотримання вимог стандартів електромагнітної сумісності технічних засобів, підвищити якість електроенергії та поліпшити умови роботи інших навантажень, в т.ч. зварювального обладнання, підключених до тієї ж мережі.

**В шостому розділі роботи** запропонований новий підхід до проектування і розробки принципів управління якістю зварювального процесу з боку джерела живлення. Розроблені декілька схемних рішень інверторних джерел з підвищеною напругою холостого ходу, що забезпечує легкий підпал і стабільне горіння зварювальної дуги. Автором запропонований варіант вдосконаленого інверторного джерела живлення для зварювання, в якому забезпечується підвищення вихідної напруги при малих струмах навантаження без зміни коефіцієнта трансформації силового високочастотного трансформатора. Суть ідеї полягає в використанні вихідного згладжуючого дроселя як вольтододавального резонансного трансформатора. Для цього він виконується з лінеаризацією вебер-амперної характеристики (наприклад, за рахунок виконання магнітопроводу з немагнітним зазором) і має додаткову обмотку. Ця обмотка з послідовно з'єднаним конденсатором утворюють контур, який підключається до вторинної обмотки силового високочастотного трансформатора за допомогою електронного ключа. Таким чином, «розгойдування» контуру проводиться силовим інвертором і не вимагає

введення додаткових перетворювачів. Система управління інвертором модифікована таким чином, що в режимі підпалу дуги (з підвищеною вихідною напругою) забезпечується зміна частоти перемикання його силових ключів. Схема силової частини такого джерела наведена на рис. 31.



Рис. 31. Силова частина інверторного джерела з резонансним контуром у вторинному ланцюзі

Запропоновано також схемне рішення, що забезпечує підвищення вихідної напруги інверторного джерела при малих струмах навантаження за рахунок введення додаткових обмоток в силовий височастотний трансформатор. Підвищена вихідна

напруга досягається за рахунок встановлення додаткового випрямляча, підключеного до додаткових обмоток, а обмеження струму виконано за рахунок реактивних елементів в височастотному ланцюзі, що дозволяє зберегти високий ККД джерела. На рис. 32 приведена електрична схема силової частини двотактного інверторного зварювального джерела живлення з підвищеною вихідною напругою при малих струмах навантаження.

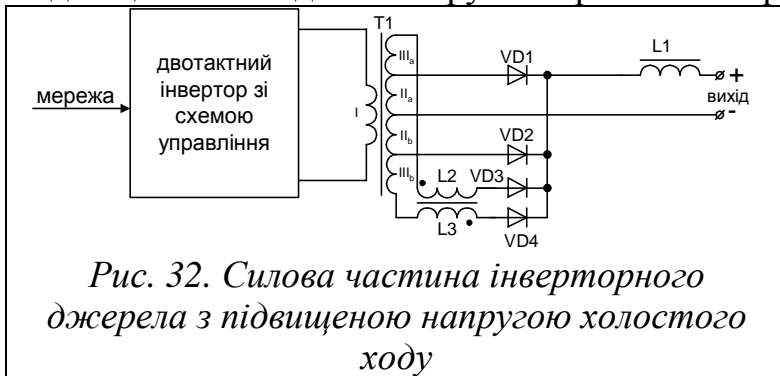


Рис. 32. Силова частина інверторного джерела з підвищеною напругою холостого ходу

Описане вище схемне рішення може бути ефективно застосоване в однофазних інверторних зварювальних джерелах живлення з метою підвищення КП. Завдяки розширенню діапазону вихідної напруги інвертора в джерелі можна застосувати випрямляч з частковою

корекцією КП за схемою Valley-Fill (рис. 33). Особливістю роботи такого випрямляча є те, що його вихідна напруга змінюється від  $\frac{1}{2}$  до 1 амплітуди напруги мережі, частота пульсацій дорівнює подвоєній частоті мережі.

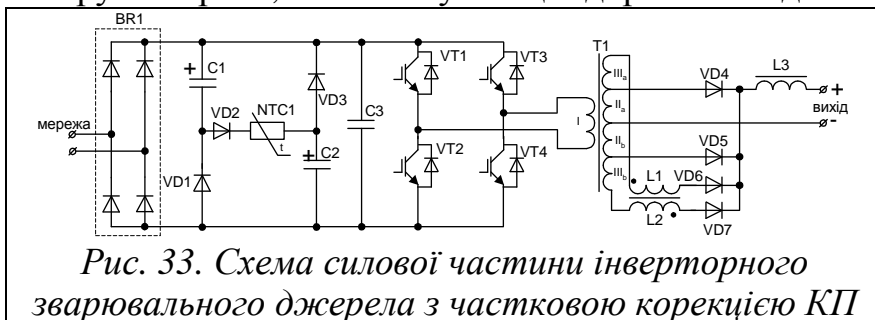


Рис. 33. Схема силової частини інверторного зварювального джерела з частковою корекцією КП

Система управління інвертором джерела синтезована таким чином, що його споживаний струм пропорційний напрузі живлення. Максимум КП в цьому випадку становить понад 0,97, а коефіцієнт гармонік вхідного струму – менше 25 %. Стійкість горіння дуги забезпечується схемним рішенням вихідного випрямляча. Така побудова схеми дає можливість різко зменшити запас енергії в накопичувальних конденсаторах, знизивши тим самим габарити і собівартість джерела, а також уникнути застосування спеціальних схем обмеження зарядного струму.

Для ТІГ зварювання змінним струмом розроблено оригінальне джерело живлення, виконане на основі низькочастотного зварювального

трансформатора з додатково встановленим послідовним активним фільтром (SAF, рис. 34), система управління яким забезпечує усунення постійної складової зварювального струму з-за вентильного ефекту дуги і формує необхідну вихідну характеристику джерела.

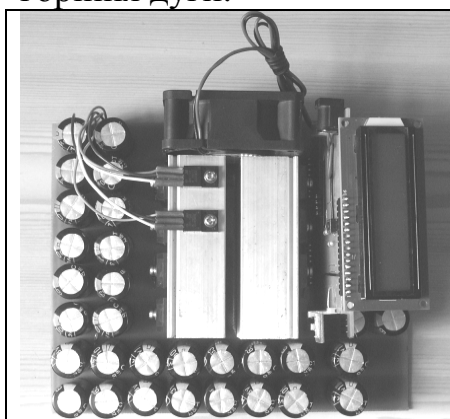


Система управління послідовним активним фільтром задовольняє наступним критеріям: 1) формує зварювальний струм з нульовим середнім значенням (для усунення підмагнічування трансформатора) і заданою

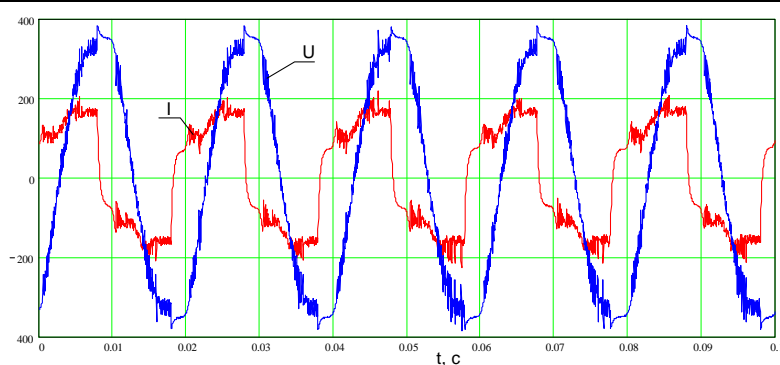
формою (для забезпечення стійкого горіння дуги і підвищення стійкості неплавкого електрода); 2) стабілізує напругу на накопичувальному конденсаторі ланки постійного струму послідовного активного фільтра для забезпечення коректної роботи його інвертора; 3) формує задану ВАХ джерела живлення (зокрема, обмеження струму КЗ для реалізації функції Lift-Arc – підпал дуги з торкання і «антизалипання», поступове підвищення струму дуги після підпалу для полегшення умов роботи неплавкого електрода); 4) має високу швидкість і малий час реакції на перехідні процеси (КЗ електрода на виріб, обрив дуги).

На рис. 35 наведено фото експериментального зразка послідовного активного фільтра на струм до 120 А. Конденсатор ланки постійного струму має ємність 20000 мкФ і максимальну робочу напругу 126 В. Схема управління інвертором виконана із застосуванням мікроконтролера з ядром ARM Cortex-M.

Можлива робота описаного джерела з випереджаючим зсувом струму по відношенню до напруги мережі, тобто джерело є генератором реактивної потужності. На рис. 36 приведені осцилограми напруги і струму джерела в такому режимі. Умови повторних підпалів дуги при зміні полярності в цьому випадку дещо гірше, ніж в режимі споживання реактивної потужності, але за рахунок високої швидкості зміни струму вдається забезпечити стабільне горіння дуги.



*Рис. 35. Послідовний активний фільтр для реалізації TIG-AC зварювання*



*Рис. 36. Осцилограма напруги та струму при роботі джерела з послідовним активним фільтром в режимі генерації реактивної потужності*

Режим генерації реактивної потужності має сенс використовувати при роботі в складі комплексу з джерелами-споживачами реактивної потужності.

У порівнянні з джерелами прямокутного струму на основі тиристорних перетворювачів (таких як ТИР-300Д) джерело з послідовним активним фільтром має такі переваги: 1) значно кращі масогабаритні показники, оскільки в якості накопичувача енергії використовуються конденсатори, а не дросель; 2) менші втрати енергії в напівпровідникових елементах через використання польових транзисторів замість тиристорів; 3) можливість управління вихідним опором джерела і формування ВАХ з потрібною жорсткістю без перемикання зварювального трансформатора.

При зварюванні алюмінію неплавким електродом на змінному струмі (TIG-AC процес) на параметри зварного шва впливають не тільки величина зварювального струму, але і його частота і скважність. Для їх регулювання в інверторних джерелах для TIG-AC зварювання на виході передбачають схему зміни полярності вихідного струму. Автором розроблений модуль зміни полярності для забезпечення TIG зварювання алюмінію і його сплавів, що дозволяє реалізувати TIG-AC процес від зварювального джерела постійного струму, в т.ч. інверторного. Схема його силової частини приведена на рис. 37, зовнішній вигляд – на рис. 38.

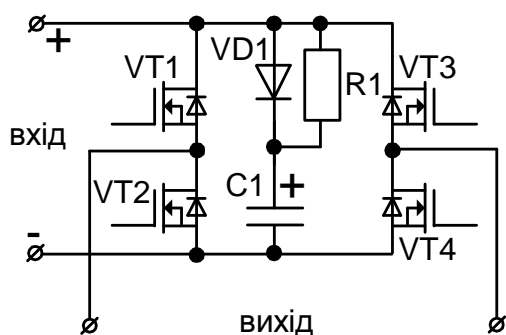


Рис. 37. Силова схема модуля зміни полярності для TIG-AC зварювання

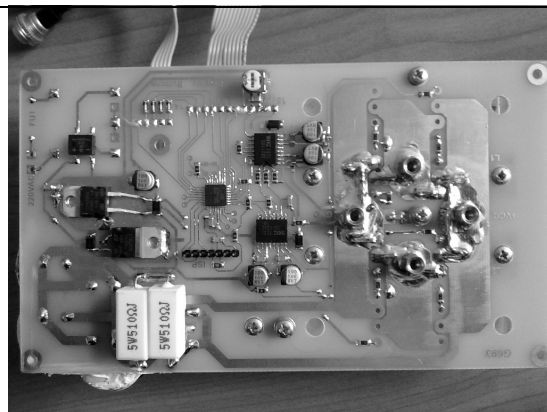
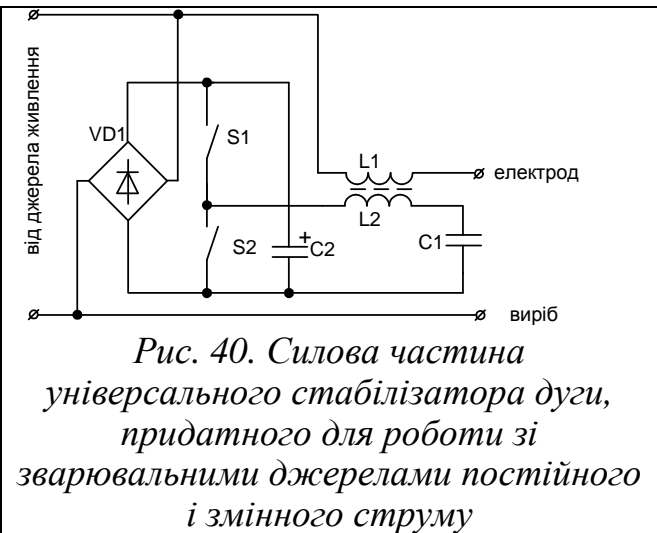
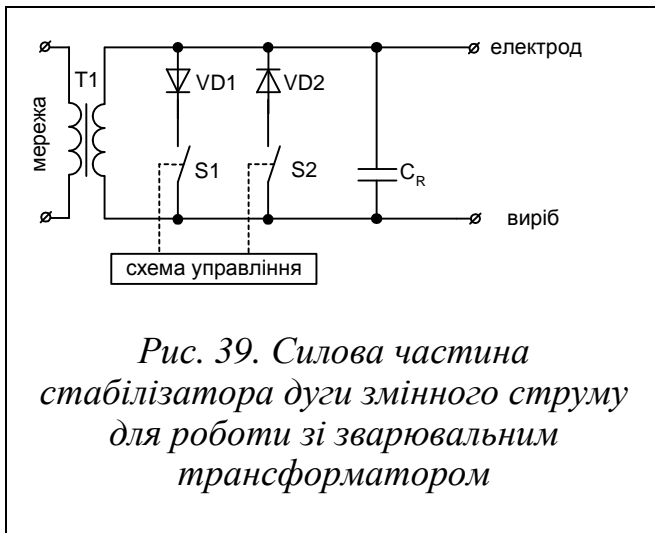


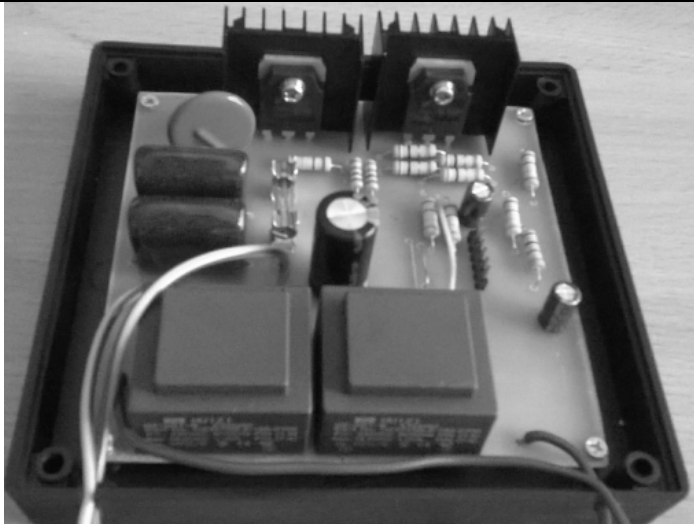
Рис. 38. Модуль зміни полярності для TIG-AC зварювання

Пристрій дозволяє регулювати частоту вихідного струму в межах 20 ... 275 Гц і міняти його скважність в діапазоні 1 ... 99 %.

Розроблені декілька оригінальних пристроїв підпалу і стабілізації зварювальної дуги. Описані варіанти таких пристроїв для роботи із зварювальними трансформаторами (рис. 39), а також універсальний пристрій стабілізації дуги (рис. 40), придатний для використання як із низькочастотними трансформаторами, так і з зварювальними інверторами, які не мають вбудованих засобів стабілізації дуги. Розроблені стабілізатори дуги відрізняються можливістю генерації пакетів високочастотних імпульсів на дуговому проміжку, що підвищує надійність підпалу дуги, та зниженими втратами енергії за рахунок ефективного використання резонансного обміну енергії між реактивними елементами схеми.



На рис. 41 показаний зовнішній вигляд стабілізатора дуги для роботи зі зварювальними трансформаторами, що мають регулювання струму за допомогою магнітного шунта. На рис. 42 показано фото універсального стабілізатора струму поряд із інверторним зварювальним джерелом.



*Рис. 41. Стабілізатор дуги змінного струму зі знятою верхньою кришкою.*



*Рис. 42. Універсальний стабілізатор дуги підключений до інверторного зварювального джерела*

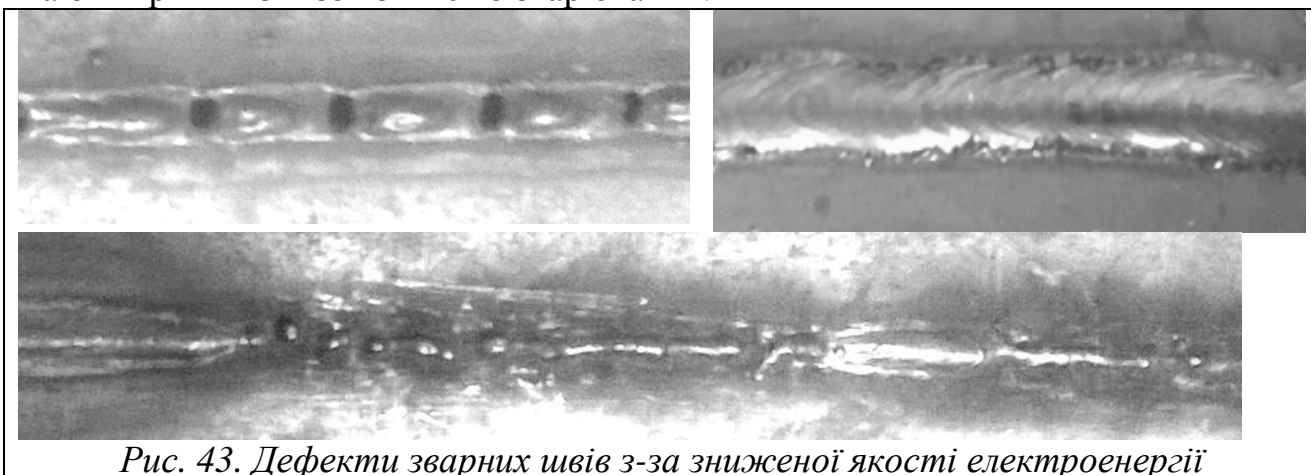
Розроблені також варіанти стабілізатора дуги змінного струму для роботи зі зварювальними трансформаторами, які відрізняються підвищеною до декількох кВ вихідною напругою, що дозволяє забезпечувати безконтактне підпалення дуги при ТІГ зварюванні. При цьому вторинна обмотка зварювального трансформатора захищена від дії високої напруги.

В цьому розділі роботи наведено інформацію про промислове випробування розроблених джерел живлення і економічний ефект, який складає 1684 тис.грн.

Промислове випробування розроблених джерел живлення проведено в умовах ТОВ «ТехМашСтрой 2012», ПрАТ «МК«Азовсталь», ПАТ «Науково-дослідний і проектно-технологічний інститут машинобудування» (м. Краматорськ), ПАТ «Маркограф», ЗАТ «Гідромаш», ДП «Маріупольський морський торговельний порт», м. Маріуполь.

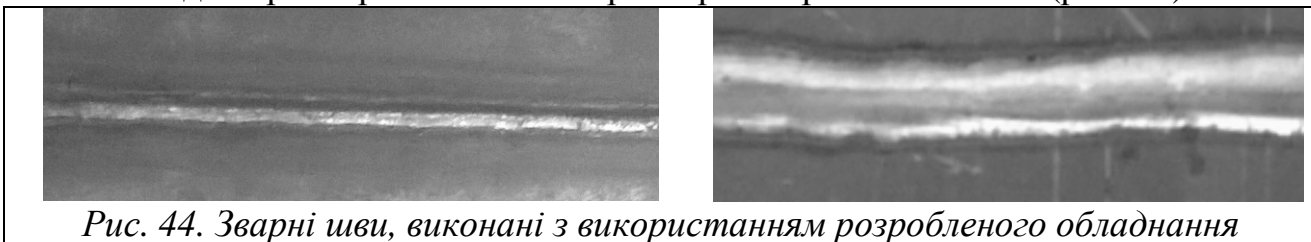
Модульні зварювальні джерела живлення і пристрої стабілізації зварювальної дуги використані при проведенні ремонтних робіт в умовах металургійних підприємств міста Маріуполь з використанням низькочастотних зварювальних трансформаторів типів ТДМ-401, СТШ-250, КИ002-500, що дозволило застосовувати електроди постійного струму типу УОНИ-13/55. Очікуваний економічний ефект складає 956 тис. грн. за рахунок підвищення якості зварних з'єднань і підвищення продуктивності праці.

Автором в промислових умовах проведена оцінка впливу якості електричної енергії на умови формування зварних з'єднань. У виробничому цеху під час здійснення зварювальних робіт була включена високочастотна установка для термічної обробки. При її включенні спостерігалось порушення стабільності роботи тиристорних приводів двигунів зварювального устаткування і джерел живлення. Це пов'язано з появою в мережі імпульсних перешкод при включенні високочастотного генератора. На рис. 43 наведені фотографії зварних швів з дефектами, викликаними спотвореннями напруги мережі. Видно порушення формування шва через порушення режиму роботи джерела живлення. Тому якість електроенергії та електромагнітна сумісність мають прямий зв'язок з якістю зварювання.



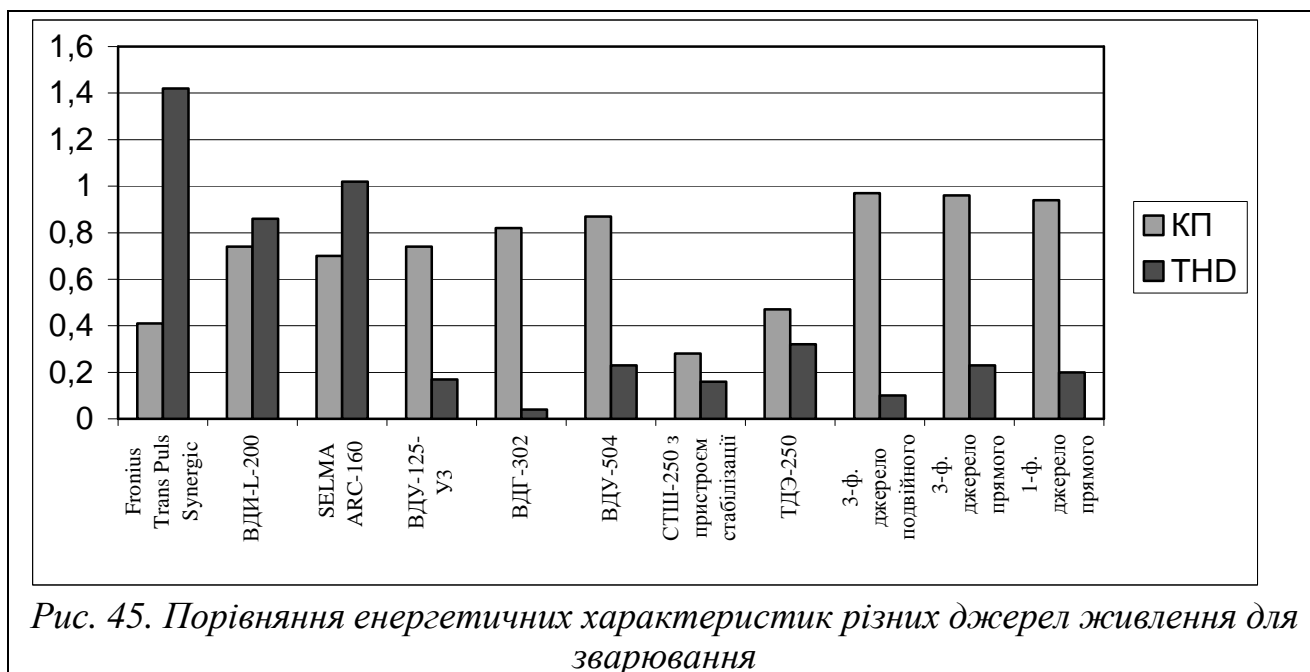
*Рис. 43. Дефекти зварних швів з-за зниженої якості електроенергії*

Використання розробленого автором обладнання дозволило суттєво покращити якість швів (причому матеріали і режими зварювання не змінювались) за рахунок значно меншої чутливості розроблених джерел живлення до параметрів якості електроенергії мережі живлення (рис. 44).



*Рис. 44. Зварні шви, виконані з використанням розробленого обладнання*

На рис. 45 показана гістограма зі зведеними результатами вимірювань КП та ТНД вхідного струму різних зварювальних джерел, включаючи розроблені. Слід відмітити, що джерела з низькочастотними трансформаторами та джерела з тиристорним регулюванням (ВДУ, СТШ, ТДЭ) мають сильну залежність енергетичних параметрів від встановленого режиму. Для них приведені дані для близької до максимальної вихідної потужності. При зниженні вихідної потужності КП таких джерел знижується.



Джерела живлення з інтегрованими функціями фільтрації вищих гармонік пройшли випробування в умовах ПАТ «Маркограф» і показали відповідність технічних характеристик заявленим. Було також підтверджено поліпшення якості електроенергії в розподільчій мережі. Розрахований очікуваний економічний ефект складає 80 тис. грн на рік.

Використання результатів дисертаційної роботи на ПАТ «Науководослідний і проектно-технологічний інститут машинобудування», м. Краматорськ, дозволило знизити трудомісткість проектно-конструкторських і проектно-технологічних робіт при розробці низки техніко-комерційних пропозицій та технічних проектів обладнання для відновлення деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування. Економічний ефект від впровадження розробок – 248 тис. грн.

Технічні рішення і алгоритми управління перетворювачами, розроблені в дисертаційній роботі, використані при створенні системи управління збудженням синхронних машин з безщітковими збудниками в умовах ПАТ «МК«Азовсталь». Впроваджене джерело живлення збудника синхронної машини зі спеціалізованою системою управління дозволяє в автоматичному режимі підтримувати задані енергетичні параметри, компенсувати реактивну потужність. Крім того, система забезпечує виявлення несправностей у роторному випрямлячі, що крутиться. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 300 тис. грн. на рік і пояснюється зниженням витрат на електроенергію і ремонт безщіткових збудників.

Джерело для ТІГ зварювання на основі послідовного активного фільтра, описане в розділі 6 дисертаційної роботи, використовувалось в умовах ДП «Маріупольський морський торговельний порт». Застосування вказаного джерела дозволило підвищити стійкість неплавких електродів, покращити якість зварних з'єднань, забезпечити стабілізацію електричних параметрів процесу зварювання. Економічний ефект склав 50 тис. грн.

В умовах сервісного центру «OK-Service» проведені випробування і організовано заказне виробництво однофазних зварювальних інверторів з корекцією КП і на 30 – 40 % меншим споживаним струмом, ніж у звичайних



інверторів без коректора КП. Це дозволяє проводити зварювальні роботи в умовах “слабкої” електричної мережі.

В умовах ЗАТ “Гідромаш”, м. Маріуполь, проведено дослідно-промислове випробування інверторного зварювального джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності. Завдяки тому, що споживаний струм джерела на 30 – 40 % нижчий, ніж у широко розповсюджених зварювальних інверторів, це дозволяє знизити навантаження на електричну мережу та/або підвищити кількість одночасно працюючих зварювальних джерел живлення. Розроблене інверторне джерело має напругу холостого ходу до 130 В, що забезпечує легкий підпал і стабільне горіння дуги під час ручного дугового зварювання. Ці властивості дозволяють покращити якісні характеристики зварних виробів, підвищити продуктивність, що дає економічний ефект в розмірі 50 тис. грн.

Економічний ефект від використання розробленого обладнання обумовлений:

- підвищенням стабільності процесу зварювання і наплавлення, забезпечення надійного сплаву основного металу з наплавленим, за рахунок значного зниження впливу коливань напруги мережі;
- підвищенням продуктивності за рахунок підвищення стійкості горіння дуги;
- підвищенням продуктивності за рахунок збільшення кількості одночасно працюючих джерел при тій же встановленій потужності мережі;
- зниженням втрат енергії в електричній мережі і підвищенням її якості, тобто нормалізацією режимів роботи обладнання в цій мережі;
- підвищенням стійкості неплавких електродів при ТІГ зварюванні;
- можливістю гнучкого управління режимом зварювання при ТІГ зварюванні, що дозволяє розширити номенклатуру робіт.

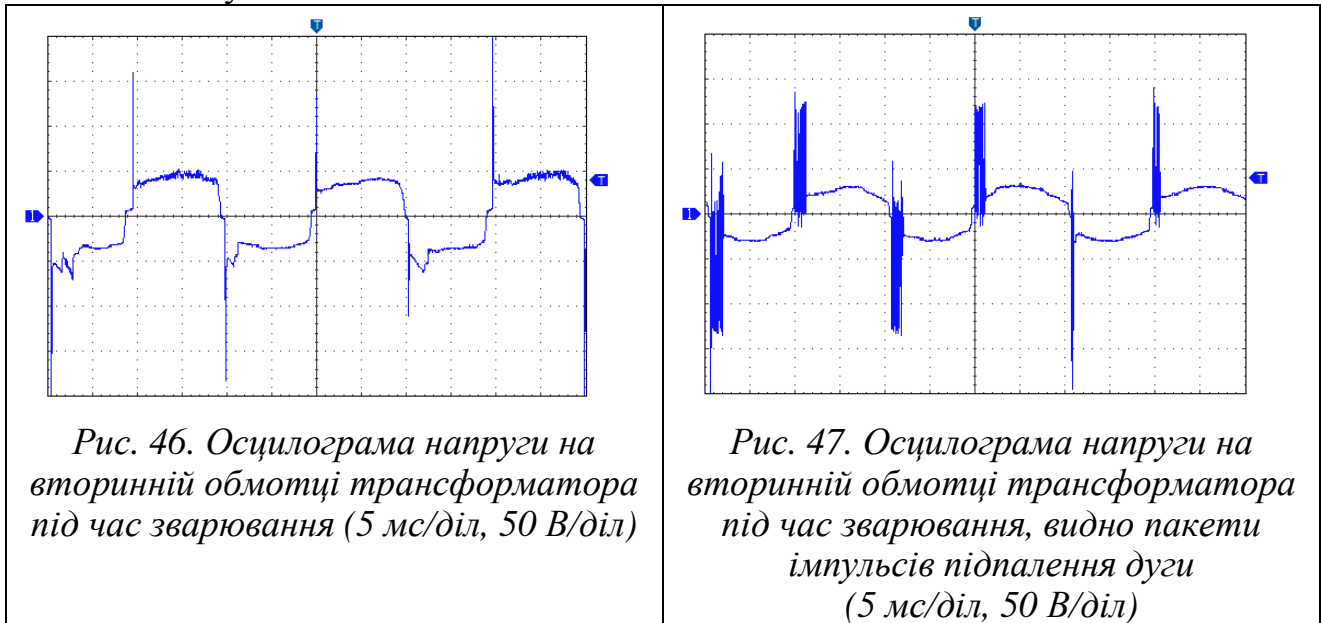
Розроблені пристрої стабілізації дуги використані для оснащення трансформаторів ТДМ-401 та СТШ-250, які застосовуються для ремонтних робіт на металургійних підприємствах м. Маріуполь. Оснащені стабілізаторами дуги зварювальні трансформатори використовувались для зварювання електродами постійного струму типу УОНИ. Перевагою розроблених стабілізаторів також є їх підключення до виводів трансформатора без втручання в його електричну схему. Система керування стабілізаторів виконана на однокристальному мікроконтролері і забезпечує реалізацію наступних функцій:

- ідентифікацію наявності дуги за результатами аналізу вторинної напруги трансформатора;
- стабілізацію напруги збудження дуги;
- автоматичне налаштування під параметри трансформатора;
- обмеження часу дії підвищеної напруги при невдалій спробі ініціації дуги;
- тепловий захист силових елементів схеми.

На рис. 46, 47 показані осцилограми вторинної напруги зварювального трансформатора ТДМ-401 з підключеним стабілізатором дуги при ручному дуговому зварюванні електродами УОНИ-13/55. Видно, що виникають ситуації (рис. 47) коли повторне збудження дуги відбувається не одразу, а після дії декількох імпульсів підвищеної напруги. Стабілізатори показали стійку роботу



у всьому діапазоні регулювання зварювального струму трансформаторів з магнітним шунтом.



Розроблені стабілізатори дуги придатні для роботи зі зварювальними трансформаторами, не обладнаними електронними засобами регулювання зварювального струму, оскільки поява високої напруги з частотою десятки кГц на вторинній обмотці трансформатора може призвести до порушення режиму роботи електронних регуляторів.

Автором розроблена версія стабілізатора дуги з двопровідним підключенням до трансформатора, тобто живлення системи керування реалізовано від вторинної напруги. Габарити такого стабілізатора дуги складають всього 110×90×48 мм.

Вимірювачі параметрів якості електроенергії, описані в розділі 2 роботи, впроваджені в навчальний процес ДВНЗ "ПДТУ" і використовуються для проведення розробленого з урахуванням можливостей вимірювального обладнання циклу лабораторних робіт.

### **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі вирішено комплекс актуальних науково-технічних завдань побудови високоефективних інверторних зварювальних джерел живлення з поліпшеною електромагнітною сумісністю і підвищеним коефіцієнтом потужності, оптимізації параметрів їх роботи, створення систем автоматичного управління роботою джерел і програмного забезпечення керуючих контролерів.

1. На підставі проведених досліджень і аналізу техніко-економічних і енергетичних характеристик існуючого зварювального устаткування обрані шляхи підвищення його енергоефективності та побудовано математичні моделі процесів, що відбуваються в зварювальних перетворювачах.

2. На підставі розроблених математичних моделей створено програмні продукти автоматичних систем управління інверторних джерел живлення з підвищеною енергоефективністю з подальшою їх практичною реалізацією, оцінені їх реальні параметри і показана адекватність реальних характеристик очікуваним за результатами моделювання.

3. Запропоновані нові наукові підходи до створення активних

випрямлячів зварювальних джерел живлення з підвищеним коефіцієнтом потужності. Розроблені схемні рішення і алгоритми управління, що дозволяють збільшити останній до 0,95 – 0,98 і знизити коефіцієнт гармонік споживаного зварювальним джерелом струму до 5 – 32 %.

4. Розроблено нові схемні рішення енергоефективних інверторних зварювальних джерел з прямим перетворенням напруги трифазної мережі в високочастотну з його подальшою трансформацією і випрямленням. Створено алгоритми управління такими перетворювачами, що забезпечують близький до одиниці вхідний коефіцієнт потужності зварювального джерела і заданий вид зовнішньої ВАХ, а також дозволяють забезпечити паралельну роботу декількох зварювальних інверторів з метою збільшення вихідного струму.

5. Розроблено новий алгоритм управління активним випрямлячем, що дозволяє поліпшити якість напруги мережі живлення, знизивши коефіцієнт гармонік напруги на 10 – 40 %. Алгоритм може бути використаний в активних випрямлячах, що мають пряме управління споживаним струмом.

6. Розроблено нові схемні рішення підвищення напруги холостого ходу інверторних зварювальних джерел живлення до 300 – 400 В (тривалістю не більше 1 с), що дозволяє полегшити запалювання і підвищити стабільність горіння дуги.

7. Розроблено новий принцип створення зварювальних джерел живлення змінного струму на основі зварювального трансформатора з нормальним розсіюванням (5 – 20 %) і послідовного активного фільтра, що дозволяє забезпечити задану ВАХ, компенсацію постійної складової при TIG зварюванні алюмінію і його сплавів, плавне регулювання зварювального струму.

8. Розроблено схемне рішення і програмний продукт системи управління однофазним інверторним зварювальним джерелом живлення з підвищеним до 0,96 коефіцієнтом потужності і збільшеною до 130 В напругою холостого ходу, що відрізняється відсутністю керованих напівпровідникових ключів у випрямлячі і зниженим запасом енергії згладжуючих конденсаторів.

9. Розроблено схемні рішення пристроїв підпалу і стабілізації дуги в джерелах змінного струму, що відрізняються використанням резонансних явищ в елементах зварювального кола і мають просту конструкцію і нескладні алгоритми управління.

10. Розроблено універсальний пристрій підпалу і стабілізації горіння дуги і програмний продукт системи управління ним. Пристрій призначений для роботи зі зварювальними джерелами постійного і змінного струму, як традиційними низькочастотними, так і сучасними інверторними. Пристрій забезпечує короткочасне, тривалістю не більше 1 с, підвищення напруги на виході зварювального джерела до 300 – 400 В і більше.

11. Розроблено програмно-апаратний комплекс обладнання для багатоканальної реєстрації електричних сигналів, що дозволяє зберігати осцилограми на ПК, обчислювати параметри якості електроенергії та виконувати експорт даних в пакет MathCad для подальшої обробки. Обладнання дозволяє проводити реєстрацію до 10 електричних сигналів з частотою вибірок 30 кГц на канал.

12. Дослідно-промислове випробування розробленого обладнання в умовах ПАТ «Науково-дослідний і проектно-технологічний інститут

машинобудування», ТОВ «ТехМашСтрой 2012», ПрАТ «МК«Азовсталь», ПАТ «Маркограф», ДП «Маріупольський морський торговельний порт», ЗАТ «Гідромаш» показало його надійну роботу і відповідність технічних параметрів заявленим. Економічний ефект склав 1 684 000 грн. Розроблене обладнання впроваджено в учбовий процес в ДВНЗ «ПДТУ».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

### Монографії:

1. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Современная схемотехника импульсных источников питания с активной коррекцией коэффициента мощности»: монографія, Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2013, 123 с.
2. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенна, «Сучасні силові активні фільтри та імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності»: монографія, Мариуполь : ПДТУ, 2015, 198 с.
3. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Активные выпрямители с коррекцией коэффициента мощности»: монографія, Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2015, 170 p.

### Статті у виданнях, включених до НБД SCOPUS:

4. **V. Burlaka**, E. Lavrova, S. Podnebennaya, I. Zakharova, «Development of single-phase high-power factor inverter welding sources», *Easter-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/1 (88), pp. 18 – 24, 2017. [НБД Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CrossRef, ResearchBib, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE)]
5. S.K. Podnebennaya, **V.V. Burlaka**, S.V. Gulakov, «A power parallel active filter with higher efficiency», *Russian Electrical Engineering*, Volume 84, Issue 6, pp. 308 – 313, June 2013. [НБД Scopus, INSPEC, Google Scholar, Academic OneFile, CNKI, EI-Compendex, Expanded Academic, Gale, INIS Atomindex, OCLC, ProQuest Materials Science & Engineering Database, ProQuest SciTech Premium Collection, ProQuest Technology Collection, Summon by ProQuest]
6. **V.V. Burlaka**, S. V. Gulakov, S. K. Podnebennaya, «A three-phase high-frequency AC/DC converter with power-factor correction», *Russian Electrical Engineering*, Volume 88, Issue 4, pp. 219 – 222, April 2017. [НБД Scopus, INSPEC, Google Scholar, Academic OneFile, CNKI, EI-Compendex, Expanded Academic, Gale, INIS Atomindex, OCLC, ProQuest Materials Science & Engineering Database, ProQuest SciTech Premium Collection, ProQuest Technology Collection, Summon by ProQuest]
7. **V.V. Burlaka**, S. V. Gulakov, «Power factor corrector with a high-order harmonics filtering function», *MATEC Web of Conferences*, Volume 113, 2017. [НБД Chemical Abstracts Service (CAS), Compendex (Engineering Village), Web of Science, DOAJ, EBSCO, Google Scholar, Inspec, Polymer Library, Scopus, ProQuest Materials Science & Engineering Database, ProQuest SciTech Premium Collection, ProQuest Technology Collection, CrossRef]
8. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Three-Phase Power Supply for Resistance Welding Machine with Corrected Power Factor», *Науковий вісник НГУ*, №4, С. 67 – 72, 2017. [НБД Ulrichsweb Global Serials Directory, Scopus, Index Copernicus, ResearchBib, EBSCO, Engineering Village, ProQuest]

### Статті у закордонних виданнях:

9. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, «Сварочный инверторный источник питания с повышенным коэффициентом мощности», *Сварочное производство*, № 9, С. 41 – 47, 2017. [НБД РІНЦ, eLIBRARY]

10. В.Ф. Сивокобыленко, А.П. Никифоров, **В.В. Бурлака**, С.К. Поднебенная, «Анализ методов предотвращения автономной работы участков сети SMART GRID 0.4 кВ», *Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ: Энергетика*, № 2, С. 26 – 34, 2015. [НБД РІНЦ, Google Scholar, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE]

11. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, Т.М. Матяшова, «Усовершенствование двунаправленного трехфазного выпрямителя», *Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ: Энергетика*, № 2, С. 30 – 36, 2013. [НБД РІНЦ, Google Scholar, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE]

### Статті у виданнях ВАК:

12. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, О.С. Савенко, «О возможностях управления параметрами качества электроэнергии со стороны электроприемников с активными выпрямителями», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. 34, С. 139 – 147, 2017. [НБД Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, ResearchBib, CiteFactor]

13. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «К вопросу повышения коэффициента мощности однофазных источников питания машин контактной сварки», *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, Вип. 46, С. 126 – 133, 2017. [НБД eLIBRARY]

14. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Автоматизированная система управления источником питания машины контактной сварки», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. 33, С. 131 – 141, 2016. [НБД Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, ResearchBib, CiteFactor]

15. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, «Инверторный прямоходовый источник питания с повышенным коэффициентом мощности», *Автоматическая сварка*, № 3, С. 59 – 61, 2017. [НБД Google Scholar, РІНЦ]

16. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «К вопросу обеспечения электромагнитной совместимости источников питания машин контактной сварки с электрической сетью», *Автоматическая сварка*, № 12, С. 54 – 58, 2016. [НБД Google Scholar, РІНЦ]

17. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Устройство для возбуждения и стабилизации сварочной дуги», *Автоматическая сварка*, № 11, С. 48 – 51, 2016. [НБД Google Scholar, РІНЦ]

18. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, «Перспективные инверторные сварочные источники питания с повышенным коэффициентом мощности», *Автоматическая сварка*, № 4, С. 53 – 57, 2016. [НБД Google Scholar, РІНЦ]

19. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, А.Л. Мостинец, «Источник питания для электродуговой сварки с повышенной энергоэффективностью», *Вісник Приазовського державного технічного*

університету. Серія: Технічні науки, Вип. 29, С. 169 – 174, 2014. [НБД Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, ResearchBib, CiteFactor]

20. В.Ф. Сивокобыленко, А.П. Никифоров, **В.В. Бурлака**, С.К. Поднебенная, «Повышение живучести комплекса электротехнического оборудования участков сети смарт-грид на основе применения активных фильтров», *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика»*, №1(16), С. 198 – 205, 2014. [НБД eLIBRARY]

21. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Применение «динамических конденсаторов» для компенсации несимметрии в электрических сетях», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*, Вип. 2/2015(30), С. 147 – 153, 2015. [НБД Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, Directory of Research Journals Indexing, Scientific Indexing Services]

22. **V.V. Burlaka**, S.V. Gulakov, S.K. Podnebennaya, O.S. Savenko, «Hybrid VAR compensator with improved efficiency», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. 29, С. 174 – 180, 2014. [НБД Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, ResearchBib, CiteFactor]

23. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, О.С. Савенко, «Гибридный компенсатор реактивной мощности с плавным регулированием», *Електротехніка та електроенергетика: науковий журнал*, № 2, С. 13 – 19, 2014. [НБД Index Copernicus]

24. **В.В. Бурлака**, «Трехфазные сварочные источники прямого преобразования с активной коррекцией коэффициента мощности», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. 26, С. 210 – 215, 2013. [НБД Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, ResearchBib, CiteFactor]

25. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Прямоходовый инверторный источник питания прямого преобразования с коррекцией коэффициента мощности», *Електротехніка та електроенергетика: науковий журнал*, № 1, С. 48 – 51, 2013. [НБД Index Copernicus]

26. **В.В. Бурлака**, «Модульный инверторный источник питания с активной коррекцией коэффициента мощности», *Научный вестник ДГМА*, №2 (10E), С. 8-13, 2012. [НБД eLIBRARY]

27. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Трехфазный инверторный источник питания с непосредственным преобразованием и повышенным коэффициентом мощности», *Автоматическая сварка*, № 7, С. 44 – 46, 2012. [НБД Google Scholar, PИНЦ]

28. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Способ повышения коэффициента мощности инверторных сварочных источников с трехфазным питанием», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*, № 3 (28), С. 69 – 73, 2012. [НБД eLIBRARY]

29. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Снижение уровня помех, генерируемых сварочными источниками питания при помощи параллельного активного фильтра с повышенной эффективностью», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*, № 3 (28), С. 221 – 225, 2012. [НБД eLIBRARY]

30. С.В. Гулаков, **В.В. Бурлака**, О.В. Харланов, И.С. Псарева, А.В. Ярыза-Стеценко, «Моделирование распределения тока в капле электродного металла при сварке в  $\text{CO}_2$ », *Захист металургійних машин від поломок*, Вип. 12, С. 242 – 244, 2013.
31. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Двухступенчатый силовой параллельный активный фильтр», *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика»*, №1(14), С. 222 – 226, 2013. [НБД eLIBRARY]
32. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Совершенствование системы управления параллельным активным фильтром», *Науковий вісник Чернівецького університету: зб.наук.пр. Фізика. Електроніка*, Т. 2, вип. 1, С. 44 – 47, 2012.
33. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, В.Г. Скосырев, «Источник питания машины контактной сварки с улучшенной электромагнитной совместимостью», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. 35, С. 162 – 168, 2017. [НБД Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, ResearchBib, CiteFactor]
34. А.А. Варфоломеев, **В.В. Бурлака**, «Обзор методов управления матричными преобразователями», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. 24, С. 282 – 289, 2012. [НБД Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, ResearchBib, CiteFactor]
35. С.В. Гулаков, **В.В. Бурлака**, О.В. Харланов, «Исследование причин разбрызгивания электродного металла при сварке в  $\text{CO}_2$ », *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*, № 1 (32), С. 188 – 192, 2014. [НБД eLIBRARY]
36. С.В. Гулаков, **В.В. Бурлака**, М.Д. Дьяченко, В.М. Дьяченко, «Стабилизатор переменного напряжения на основе матричного преобразователя», *Вісник Приазовського державного технічного університету*, Вип. 18, С. 145 – 148, 2008.
37. С.В. Гулаков С.В., **В.В. Бурлака**, С.К. Бублик, М.Д. Дьяченко, «Параллельный активный фильтр с повышенным коэффициентом подавления высших гармоник тока», *Вісник Приазовського державного технічного університету*, Вип. 19, С. 237 – 241, 2009.
38. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Перспективные сварочные источники с трехфазным питанием», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 2 (19), С. 48 – 51, 2010. [НБД eLIBRARY]
39. С.В. Гулаков, **В.В. Бурлака**, С.К. Бублик, М.Д. Дьяченко, «Снижение уровня помех, генерируемых сварочными источниками питания», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 2 (19), С. 91-95, 2010. [НБД eLIBRARY]
40. **В.В. Бурлака**, С.К. Поднебенная, М.Д. Дьяченко, «Обзор методов управления активными фильтрами», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, Вип. 1/2011 (13), С. 51 – 54, 2011. [НБД Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, Directory of Research Journals Indexing, Scientific Indexing Services]
41. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.А. Федоровская, «Метод управления корректором коэффициента мощности с интегрированными функциями активного

фільтра», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. 22, С. 226 – 231, 2011. [НБД *Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, ResearchBib, CiteFactor*]

42. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, «Импульсный 3-фазный источник питания с непосредственным преобразованием и активной коррекцией коэффициента мощности», *Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації*, № 3(25) 2011, С. 116 – 121, 2011.

43. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, «Преобразователь для TIG сварки» на *VIII міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2015, С. 308.

44. **В.В. Бурлака**, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, В.Г. Скосырев, «Анализ подходов к реализации систем беспроводной передачи энергии с использованием низкочастотных магнитных полей», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. 35, С. 156 – 161, 2017. [НБД *Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, ResearchBib, CiteFactor*]

45. С.В. Гулаков, **В.В. Бурлака**, А.И. Кулябина, «Особенности горения дуги на торце ленточного электрода», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 2 (38), С.107 – 110, 2016. [НБД *eLIBRARY*]

#### Статті в інших виданнях:

46. **V.V. Burlaka**, S.K. Podnebennaya, «A Hybrid Three-Phase Boost-Type PFC Rectifier», in *Proc. of International Young Scientists Forum on Applied Physics*, 2015.

47. **V.V. Burlaka**, S.V. Gulakov, «Hybrid power-factor-corrected recitifer for switchmode welding power supplies», на *VII научно-технічеській конференції молодих учених и спеціалістів «Сварка и родственные технологии»*, Киев: ІЭС ім. Е.О.Патона, 2015, С. 188.

48. С.К. Поднебенная, **В.В. Бурлака**, «Двухступенчатый подход к проектированию силовых параллельных активных фильтров», на *17-м Международном молодежном форуме «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»*, Т. 1, С. 25 – 26, 2013.

#### Патенти:

Технічні рішення, наведені в роботі, захищені патентами України на винаходи №№ 92420, 92694, 92979, 93579, 94778, 95208, 95418, 96382, 97570, 100090, 100449, 100478, 101259, 102038, 102041, 102042, 102631, 102640, 102641, 102648, 102652, 104499, 104830, 104832, 105081, 105133, 105993, 106000, 106021, 106174, 106564, 109219, 109375, 111290, 111493, 111497, 112554, 114638, 114689, 114987, 114990, 114991, 114998, 115200, та патентами України на корисні моделі №№ 63702, 67375.

## АНОТАЦІЯ

Бурлака В.В. Розробка теоретичних і науково-технологічних принципів створення енергоефективних інверторних джерел живлення для зварювальних процесів і споріднених технологій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології. – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2018.

Робота направлена на вирішення задач створення енергоефективних зварювальних джерел живлення. При цьому під енергоефективністю визначається не тільки ефективність перетворення енергії (ККД), але і електромагнітна сумісність джерела живлення, здатність легко підпалювати і стабілізувати горіння зварювальної дуги, добрі масогабаритні характеристики, можливість застосування сучасних методів управління, які забезпечують контрольований процес горіння дуги, перенос електродного металу і т.ін.

Завдяки розвитку напрямку розробки інверторних джерел, що мають підвищену швидкодію, з'явилися технології забезпечення контрольованого перенесення електродного металу, зниження розбризкування і ін. Але при цьому часто залишається без уваги проблема електромагнітної сумісності інверторних зварювальних джерел живлення з мережею. Інверторні зварювальні джерела є потужними генераторами струмів вищих гармонік, що призводить до порушення режиму роботи електричної мережі, підвищення втрат енергії в ній, спотворення форми кривої напруги. Більш того, невідповідність більшості інверторних джерел сучасним стандартам електромагнітної сумісності не дозволяє організувати їх експорт.

Тому в роботі основна увага приділяється розробці таких підходів до створення зварювальних інверторних джерел живлення, які дозволять при збереженні якості реалізації технологічного процесу зварювання, наплавлення і ін. супутніх процесів або усунути, або компенсувати негативні ефекти, пов'язані з їх роботою в електричній мережі, і забезпечити виконання вимог стандартів електромагнітної сумісності.

Відповідно до цього цілі і завдання роботи – це розробка принципів створення таких зварювальних джерел, які, крім добрих технічних і масогабаритних параметрів, відповідають сучасним стандартам електромагнітної сумісності.

Актуальність роботи обумовлена ще й тим, що в Україні введені в дію стандарти (ДСТУ ІЕС 60974-10:2007, ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004, ДСТУ ІЕС 60974-10:2007), які обмежують емісію гармонік струму технічними засобами. В 2014 році введений стандарт електромагнітної сумісності для обладнання з струмом від 16 до 75 А на фазу (ДСТУ EN 61000-3-12:2014). У цю категорію потрапляє абсолютна більшість зварювальних джерел.

Для рішення поставлених задач запропоновано декілька підходів:

- розробка активних випрямлячів для зварювальних інверторів з подвійним перетворенням енергії;
- розробка зварювальних інверторів з частковою корекцією коефіцієнта потужності;
- розробка зварювальних джерел прямого перетворення;



- розробка зварювальних джерел з інтегрованими функціями паралельних активних фільтрів вищих гармонік, здатних частково компенсувати негативні наслідки роботи в електричній мережі іншого обладнання з нелінійним характером вхідного опору;
- модифікація існуючого зварювального обладнання з низькочастотними трансформаторами за рахунок розробки блоків керування, які забезпечують ефективне формування необхідних вихідних характеристик;
- розробка універсальних пристроїв підпалу і стабілізації горіння зварювальної дуги, придатних для роботи як з існуючими низькочастотними, так і з інверторними зварювальними джерелами.

### АННОТАЦІЯ

Бурлака В.В. Разработка теоретических и научно-технологических принципов создания энергоэффективных инверторных источников питания для сварочных процессов и родственных технологий. - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.03.06 «Сварка и родственные процессы и технологии» Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2018.

Работа направлена на решение задач создания энергоэффективных сварочных источников питания. При этом под энергоэффективностью подразумевается не только эффективность преобразования энергии (КПД), но и электромагнитная совместимость источника питания, способность легко поджигать и стабилизировать горение сварочной дуги, хорошие массогабаритные характеристики, возможность применения современных методов управления, обеспечивающих контролируемый процесс горения дуги, перенос электродного металла и т.д.

Благодаря развитию направления разработки инверторных источников, имеющих повышенное быстродействие, появились технологии обеспечения контролируемого переноса электродного металла, снижение разбрызгивания и др. Но при этом часто остается без внимания проблема электромагнитной совместимости инверторных сварочных источников питания с сетью. Инверторные сварочные источники являются мощными генераторами токов высших гармоник, что приводит к нарушению режима работы электрической сети, повышению потерь энергии в ней, искажению формы кривой напряжения. Более того, несоответствие большинства инверторных источников современным стандартам электромагнитной совместимости не позволяет организовать их экспорт.

Поэтому в работе основное внимание уделяется разработке таких подходов к созданию сварочных инверторных источников питания, которые позволят при сохранении качества реализации технологического процесса сварки, наплавки и др. сопутствующих процессов или устранить, или скомпенсировать негативные эффекты, связанные с их работой в электрической сети, и обеспечить выполнение требований стандартов электромагнитной совместимости.

В соответствии с этим цели и задачи работы – это разработка принципов создания таких сварочных источников, которые, кроме хороших технических и массогабаритных параметров, удовлетворяют требованиям современных стандартов электромагнитной совместимости.

Актуальность работы обусловлена еще и тем, что в Украине введены в действие стандарты (ДСТУ ІЕС 60974-10: 2007, ДСТУ ІЕС 61000-3-2: 2004, ДСТУ ІЕС 60974-10:2007), которые ограничивают эмиссию гармоник тока техническими средствами. В 2014 году введен стандарт электромагнитной совместимости для оборудования с током от 16 до 75 А на фазу (ДСТУ EN 61000-3-12: 2014). В эту категорию попадает абсолютное большинство сварочных источников.

Для решения поставленных задач предложено несколько подходов:

- разработка активных выпрямителей для сварочных инверторов с двойным преобразованием энергии;
- разработка сварочных инверторов с частичной коррекцией коэффициента мощности;
- разработка сварочных источников прямого преобразования;
- разработка сварочных источников с интегрированными функциями параллельных активных фильтров высших гармоник, способных частично компенсировать негативные последствия работы в электрической сети другого оборудования с нелинейным характером входного сопротивления;
- модификация существующего сварочного оборудования с низкочастотными трансформаторами за счет разработки блоков управления, обеспечивающих эффективное формирование необходимых выходных характеристик;
- разработка универсальных устройств поджига и стабилизации горения сварочной дуги, пригодных для работы как с существующими низкочастотными, так и с инверторными сварочными источниками.

### **ABSTRACT**

Burlaka V.V. “Development of theoretical, scientific and technological principles for the creation of energy-efficient inverter-type power supplies for welding processes and related technologies”. – Scientific qualification work with the rights of manuscript.

Dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.03.06 – “Welding and related processes and technologies” – Donbass State Machine Building Academy, Kramatorsk, 2018.

The work is devoted to solving the problems of creating energy-efficient power supplies for welding. It is worth to note that energy efficiency is determined not only by the energy conversion efficiency itself, but also by the electromagnetic compatibility of the power supply, its ability to easily ignite and stabilize the welding arc, good weight and size characteristics, the possibility of application of modern control methods that provide control over the process of arc burning, over the transfer of the electrode metal and so on.

Due to the development of the high performance inverter-type power supplies with, various technologies for ensuring controlled transfer of electrode metal, reduction of spattering, etc., appeared. However, the problem of electromagnetic compatibility of inverter welding power supplies with the network often goes unnoticed. Inverter welding supplies are powerful generators of high-order current harmonics, which leads to a deterioration of the operation efficiency of the electrical network, increasing energy losses in it, inducing distortion of the voltage waveform. Moreover, the nonconformance of most inverter-type power supplies with modern electromagnetic compatibility standards does not allow to organize their export.

Therefore, the main attention in the work is paid to the development of such approaches to the creation of inverter-type power supplies for welding, which, while maintaining the quality of the implementation of the technological process of welding, surfacing, etc. associated processes, will allow to eliminate or partially compensate the negative effects associated with their work in the electrical network, and ensure compliance with the requirements of the electromagnetic compatibility standards.

In accordance with this goal, the main task of present work is the development of the principles of creating such welding power supplies, which, in addition to good technical, weight and size parameters, meet the requirements of current electromagnetic compatibility standards.

The relevance of the work is also determined by the fact that in Ukraine, standards that limit the emission of harmonic currents by technical means have been put in place (DSTU IEC 60974-10: 2007, DSTU IEC 61000-3-2: 2004, DSTU IEC 60974-10:2007). In 2014, a standard for electromagnetic compatibility for equipment with a current of 16 to 75 A per phase was introduced (DSTU EN 61000-3-12: 2014). The vast majority of welding power supplies fall into this category of equipment.

Several approaches are proposed for solving the aforementioned problems:

- development of active rectifiers for inverter welding supplies with double energy conversion (AC/DC/AC);
- development of welding inverters with partial power factor correction;
- development of direct conversion power supplies for welding;
- development of welding power supplies with integrated functions of parallel active power filters of high-order harmonics, which can partially compensate the negative effects of operation of other equipment with a nonlinear input resistance in the electrical network;
- modification of existing welding equipment with low-frequency transformers by means of the development of control blocks and systems that ensure the effective formation of the required output characteristics;
- development of universal devices for excitation and stabilization of welding arc burning, suitable for work with existing low-frequency, and with inverter-type welding power supplies.

Підп. до друку 30.03.2018. Формат 60×84/16.

Ум. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 1,9.

Тираж 100 пр. Зам. № 89

Видавець

Поліграфічний центр

ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”

87555, Маріуполь, вул. Університетська, 7.

Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи

ДК № 3729 від 15.03.2010 р.