

Відгук офіційного опонента  
доктора технічних наук, доцента Малінова Володимира Леонідовича  
на дисертаційну роботу Бурлаки Володимира Володимировича  
«Розробка теоретичних і науково-технологічних принципів створення  
енергоефективних інверторних джерел живлення для зварювальних процесів  
і споріднених технологій», представлену на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені  
процеси і технології.

Дисертація складається з вступу, 7 розділів, висновків, списку першоджерел із 313 посилань, додатків. Загальний обсяг дисертації складає 333 с.

## 1. Актуальність обраної теми дисертації

У зв'язку з постійно зростаючою вартістю енергоносіїв, в т.ч. електроенергії, енергозбереження є виключно актуальною проблемою. Тому створення високоефективних зварювальних джерел живлення, що забезпечують перетворення енергії з малими втратами і задовольняють сучасним стандартам електромагнітної сумісності технічних засобів є важливою науковою і практичною задачею.

При розробці зварювальних інверторів часто залишається без уваги проблема електромагнітної сумісності таких 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.

В пропонованій 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. У зв'язку з цим робота є актуальною.

## 2. Аналіз змісту дисертаційної роботи

У вступі наведено обґрунтування теми роботи, зазначені предмет, об'єкт дослідження, сформульовані мета і завдання, обрані методи

дослідження. Приведено відомості про апробацію, наукову новизну і практичну значимість отриманих в роботі результатів.

В першому розділі роботи проведено літературний огляд питань енергоефективності джерел живлення, впливу зварювального обладнання на електричну мережу, 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. Наведено опис спроектованого і виготовленого автором комплексу електронного обладнання для проведення електричних вимірювань і випробувань джерел живлення для зварювання.

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). На основі літературного огляду і проведених досліджень визначені шляхи подальшого підвищення енергоефективності зварювального обладнання, сформульовані цілі роботи.

В четвертому розділі роботи йдеться про розробку принципів створення енергоефективних зварювальних джерел живлення. Запропоновано цифрову систему управління активним коректором коефіцієнта потужності з підвищеною швидкістю регулятора вихідної напруги. 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. В другій частині розділу наведені розроблені автором оригінальні схемні рішення і алгоритми управління активних випрямлячів з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності, які відрізняються при високій якості процесу зварювання якісним формуванням вхідних струмів і забезпечують споживання зварювальним джерелом струму без реактивної компоненти і з малим вмістом вищих гармонік.

Запропоновано декілька варіантів схем зварювальних джерел прямого перетворення з різною кількістю та режимами роботи силових

високочастотних трансформаторів. Проведена оцінка методів управління інверторними зварювальними джерелами живлення, запропоновані структури систем автоматичного управління, які дозволяють формувати вихідну характеристику джерела з заданим нахилом (тобто регулювати вихідний опір джерела), а також дозволяють організувати паралельну роботу декількох інверторних джерел, що дає змогу забезпечити живлення процесів відносно великої потужності, наприклад, наплавлення стрічковим електродом.

У п'ятому розділі роботи розроблені принципи створення інверторних джерел живлення з функціями поліпшення спектрального складу напруги мережі. Вперше 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. Спосіб може бути застосований для практично всіх відомих топологій активних випрямлячів, в яких реалізовано пряме управління вхідним струмом.

В шостому розділі роботи запропонований новий підхід до проектування і розробки принципів управління параметрами зварювального процесу з боку джерела живлення. Розроблені декілька схемних рішень інверторних джерел з підвищеною напругою холостого ходу для забезпечення легкого підпалу і стабільного горіння зварювальної дуги. Розроблено оригінальне джерело для зварювання змінним струмом неплавким електродом, яке виконане на основі низькочастотного зварювального трансформатора з додатково встановленим послідовним активним фільтром, система управління яким забезпечує усунення постійної складової зварювального струму і формує необхідну вихідну характеристику джерела.

Розроблено модуль зміни полярності для реалізації процесів зварювання неплавким електродом при застосуванні зварювальних інверторів з постійним вихідним струмом. За допомогою такого модуля можлива реалізація TIG-AC процесу від розповсюджених зварювальних інверторів для MMA процесу.

Розроблені декілька пристроїв підпалу і стабілізації зварювальної дуги. Описані варіанти таких пристроїв для роботи із зварювальними трансформаторами, а також універсальний пристрій стабілізації дуги, придатний для використання як із низькочастотними трансформаторами, так і з зварювальними інверторами, які не мають вбудованих засобів стабілізації дуги.

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

### 3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність

Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань автором 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. Отримані результати, наукові положення, висновки і рекомендації не суперечать відомим фізичним закономірностям і є достатньо обґрунтованими. Тому їх достовірність не викликає сумнівів.

### 4. Наукова новизна

Наукова новизна роботи полягає в створенні основ нового напрямку в розробці зварювальних інверторних джерел живлення з функціями поліпшення якості напруги мережі. Вперше запропоновано спосіб управління активним випрямлячем джерела живлення, що забезпечує поліпшення якості напруги мережі живлення за рахунок установки вхідного струму активного випрямляча пропорційно різниці миттєвого 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 пропорційності для вхідного струму встановлюється з умови балансу вихідної потужності активного випрямляча і потужності його навантаження.

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.

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.

## 5. Повнота викладу наукових положень дисертаційної роботи в опублікованих працях

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 статті в збірниках ВАК, 3 статті в інших наукових виданнях. Новизна розробок підтверджена 46 патентами України (44 патенти на винаходи і 2 патенти на корисні моделі). Особистий 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.

Особистий внесок автора також детально наведений в авторефераті роботи.

Кількість публікацій за темою дисертації є достатньою.

Для апробації дисертаційної роботи її основні положення і результати 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).

#### 6. Значимість для науки і практики розробок і рекомендацій, представлених в роботі

Дисертаційна 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). В останній роботі автор є керівником.

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 возбуждающими устройствами бесщеточных возбудителей синхронных двигателей компрессоров КТК кислородного цеха» (замовник - ПрАТ «МК«Азовсталь», договір 04 / 0148Н від 16.06.2014 р., м. Маріуполь).

Практична цінність роботи полягає в наступному:

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». Очікуваний економічний ефект становить 1 684 000 грн.

Позитивною особливістю роботи є те, що розроблені джерела живлення захищені патентами України та можуть бути використані не тільки



для реалізації зварювальних і супутніх процесів, а й в інших областях: машинобудуванні, металургії, енергетиці, медицині, оборонній промисловості та ін.

## 7. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Вважаю, що дисертаційна робота відповідає вимогам ДСТУ 3008:2015 “Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення” та вимогам нормативних документів щодо оформлення дисертацій та авторефератів.

## 8. Зауваження по роботі

1. Для ліпшого сприйняття узагальненого системного підходу створення інверторних зварювальних джерел різного призначення доцільно було б ввести в роботу структурну схему вибору напрямків і алгоритмів їх розробки.

2. В роботі не розкрита роль математичного моделювання процесів, яке використовували при розробці нових схемних рішень і алгоритмів управління інверторними зварювальними джерелами різного призначення.

3. Доцільно було б розглянути методи керування переносом електродного металу за рахунок імпульсів струму при використанні розроблених інверторних зварювальних джерел (у порівнянні з відомими методами керованого переносу – STT від Lincoln Electric, та ін.).

4. Також бажано було б розкрити вплив на характеристики плавлення, формування зварювальної ванни, якість наплавленого металу запропонованих технічних рішень при використанні розроблених зварювальних джерел живлення у порівнянні з відомими джерелами.

5. В роботі не наведені дані о зварних з'єднаннях і електродних матеріалах, які використали при промислових випробуваннях.

6. Не наведено даних про експериментальне випробування зварювальних джерел при паралельній роботі. Наскільки рівномірно зварювальний струм розподіляється між окремими джерелами при їх паралельній роботі, який коефіцієнт запасу треба використати?

7. В дисертації немає інформації про те, чи можливе застосування розроблених автором стабілізаторів дуги у комплексі з джерелами живлення на основі низькочастотних зварювальних трансформаторів з послідовними активними фільтрами?

## 9. Висновок

Дисертаційна робота Бурлаки Володимира Володимировича на тему «Розробка теоретичних і науково-технологічних принципів створення енергоефективних інверторних джерел живлення для зварювальних процесів і споріднених технологій» відповідає паспорту спеціальності 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології.

Представлена дисертація є закінченим науковим дослідженням, що має наукову та практичну цінність. Кількість публікацій здобувача за темою роботи є достатньою.

Наведені в роботі результати і висновки є достатньо обґрунтованими і експериментально підтверджені. Автореферат в достатній мірі відображує суть дисертації.

Наукові положення, що виносяться на захист докторської дисертації, не співпадають з тими, за якими здобувач захистив дисертацію кандидата наук.

За результатами ознайомлення з дисертаційною роботою вважаю, що за своїм науковим рівнем представлена дисертація відповідає вимогам п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор Бурлака Володимир Володимирович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, доцент,  
експерт з матеріалів та зварювання  
ТОВ «Бюро Верітас Україна»

В.Л. Малінов