

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу КАРБІВСЬКОЇ Тетяни Олексіївни

«Перетворювачі електроенергії з модульною структурою та зниженим рівнем пульсацій для контактного зварювання»

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 171 Електроніка

Актуальність теми. Контактне зварювання широко застосовується в різних галузях техніки. Воно здійснюється шляхом затискання двох металевих деталей між двома електродами з необхідною силою стиснення та пропускання крізь них імпульсу струму необхідної форми, за рахунок чого деталі нагріваються та з'єднуються між собою. Такий процес є досить складним, оскільки електричний опір зони зварювання має складний, нелінійний характер, залежить від матеріалу, товщини, шорсткості поверхні деталей та електродів. При з'єднанні деталей відповідального призначення, відсутність виплесків часток розплавленого металу та висока повторюваність параметрів зварних точок мають критичне значення. Використання імпульсів струму з низьким рівнем пульсацій дозволяє отримати зварні з'єднання високої міцності без виплесків металу. Основні вимоги до параметрів зварювання покладають на джерело живлення, що забезпечує необхідну форму імпульсу зварного струму. Використання модульного способу побудови джерела живлення може покращити точність формування струму, підвищити рівень потужності в навантаженні, а також технологічність, гнучкість перебудови та рівень уніфікації перетворювача.

Враховуючи зазначене, тема дисертаційної роботи «Перетворювачі електроенергії з модульною структурою та зниженим рівнем пульсацій для контактного зварювання» є актуальною і спрямованою на вирішення важливої науково-практичної задачі – розвитку принципів побудови перетворювачів електроенергії для контактного зварювання в частині забезпечення високих показників енергоефективності та точності формування зварювального струму.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України “Енергетика та енергоефективність” і планів виконання науково-дослідних робіт кафедри електронних пристроїв та систем за темами: ДБ № 0116U006924 “Підвищення показників енергоефективності та ресурсозбереження засобами силової електроніки для технології отримання високонадійних зварюваних з'єднань різнорідних матеріалів”; ДБ № 0119U100189 “Науково-технічні засади створення приладів контактного зварювання біологічних тканин імпульсами постійного струму”; ДБ № 0120U101285 “Енергоефективні системи швидкого заряду комбінованих ємнісних накопичувачів енергії типу суперконденсатор-акумуляторна батарея”; а також в рамках виконання гранту від міжнародної організації IEEE - IEEE Student Application Papers Implementing Industry Standards “Thermal and Surge Current Protection Means for Semiconductor Power Non-Isolate Converters”.

Наукова новизна одержаних результатів. В результаті розв'язання поставлених в дисертаційній роботі задач авторка отримала нові наукові результати, що висуваються на захист:

1. Вперше запропоновано використання топології перетворювача для контактного зварювання, в якому за рахунок додавання ланки компенсації пульсацій струму навантаження та використання модульної структури забезпечується отримання високих показників енергоефективності та точності формування імпульсів струму.

2. Вперше побудовано математичну модель одного модулю перетворювача з модульною структурою та зниженим рівнем пульсацій, яка враховує паразитні опори елементів схеми, дозволяє виконувати аналіз динамічних характеристик та визначення прийнятних з практичної точки зору параметрів налаштувань регулятора.

3. Вперше побудовано математичну модель перетворювача з модульною структурою та зниженим рівнем пульсацій для довільної кількості модулів, яка

дозволяє виконувати аналіз її динамічних характеристик та визначення прийнятних з практичної точки зору параметрів налаштувань регулятора.

4. Вдосконалено методику синтезу регулятора, яка базується на запропонованій моделі одного модуля перетворювача та дозволяє отримати опорні налаштування регулятора і шляхом поступового наближення забезпечити його прийнятні з практичної точки зору параметри.

Практична значимість результатів роботи полягає в наступному:

1. Розроблена схема електрична принципова модуля на основі запропонованої топології перетворювача з додатковою ланкою компенсації пульсацій струму навантаження, а також експериментальний зразок перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій для контактного зварювання, які можуть бути використані при побудові джерел живлення для контактного зварювання, а також інших застосувань, коли важливе значення має точність вихідного струму за умови мінімізації потужності втрат.

2. Розроблена імітаційна модель одного модуля перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій для контактного зварювання, яка може бути використана розробниками при проектуванні джерел живлення для контактного зварювання з n -модулями, коли важливе значення має точність вихідного струму за умови мінімізації потужності втрат, а також гнучкість при зміні конфігурації джерела живлення.

3. Вдосконалено методику розрахунку втрат в імпульсному понижуючому перетворювачі для контактного зварювання з врахуванням втрат на індуктивних елементах схеми, яка може бути використана під час проектування понижуючих перетворювачів на високі струми навантаження та частоту.

Варто зазначити, що практична цінність дисертаційного дослідження, окрім відповідності науково-дослідним роботам, підтверджується також впровадженням у навчальний процес факультету електроніки НТУУ КПІ для здобувачів першого і другого рівня освіти, впровадженням у розробки НДІ електроніки та мікросистемної техніки НТУУ КПІ та в дослідно-конструкторські розробки ТОВ “Беннінг Пауер Електронікс”.

Повнота викладу результатів дослідження в опублікованих працях, зарахованих за темою дисертації.

Основні результати дисертації висвітлені в 20 наукових публікаціях (2015-2020), що включають, зокрема, 7 статей у наукових фахових виданнях (3 статті у періодичних наукових виданнях Латвії, Польщі, США, з яких 1 індексована НМБД Web of Science, 3 статті у фахових виданнях категорії Б та 1 стаття у фаховому виданні категорії А, що індексовано НМБД Web of Science) та 13 публікацій в збірниках матеріалів конференцій, серед яких 5 індексовано НМБД Scopus та Web of Science.

Викликає питання доцільність включення двох тез доповідей 2015-2016 року до переліку основних публікацій, якщо формально робота над дисертацією була розпочата пізніше. Також публікації [10] і [14] опубліковані в одному збірнику матеріалів конференції KhPI Week 2020. Однак, наявні наукові публікації за рівнем та кількістю відповідають вимогам пункту 11 постанови Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167.

Аналіз змісту поданих публікацій дозволяє зробити висновок, що вони знайшли відображення в рукописі дисертаційної роботи. Ключові положення, що в повній мірі розкривають результати дисертації, апробовано на 13 міжнародних наукових конференціях, зокрема, 4 закордонних.

Окремо варто зазначити, що 11 із 20 наукових публікацій англomовні, у 7 публікаціях здобувачка є першим автором, наявні 2 публікації без співавторів. Широке представлення результатів закордоном (Латвія, Естонія, Польща, Португалія, США) відповідає принципам відкритості та інтернаціоналізації наукових досліджень.

Відсутність порушень академічної доброчесності. Аналіз змісту дисертаційного дослідження, отриманих результатів та наявних джерел інформації, дозволяє стверджувати, що дисертація містить результати власних досліджень здобувачки, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела, що свідчить про відсутність порушень академічної доброчесності авторкою дисертації.

Оцінка змісту та завершеності дисертації. Дисертаційна робота загальним обсягом 179 сторінок містить анотації українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел із 106 найменувань та 5 додатків. Основна частина дисертації містить 124 сторінки тексту, 55 рисунків та 1 таблицю.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення та наведено дані про апробацію результатів дисертації та публікацій.

У першому розділі розкрито особливості перебігу процесу контактного зварювання, проведено аналітичний огляд наукових публікацій з метою дослідження існуючих технічних рішень та принципів побудови джерел живлення для контактного зварювання, обґрунтовано вибір транзисторного перетворювача з використанням імпульсного способу керування транзисторами. Також розкрито особливості побудови перетворювачів з модульною структурою.

У другому розділі розглянуто топології транзисторних перетворювачів, які можуть бути використані як базовий модуль джерела живлення з модульною структурою для контактного зварювання. Проведено оцінку енергоефективності транзисторних перетворювачів під час роботи на імпульсне навантаження з високою амплітудою струму, характерною для контактного зварювання. Обґрунтовано вибір перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій як базового модуля джерела живлення для контактного зварювання.

У третьому розділі побудовано математичні моделі базового модуля перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій та перетворювача, що складається з n уніфікованих модулів перетворювачів зі зниженим рівнем пульсацій. Показано, що модель перетворювача з модульною структурою для контактного зварювання та зниженим рівнем пульсацій є універсальною та може бути використана для n -ї кількості базових модулів, що працюють на спільне навантаження.

У четвертому розділі наведено імітаційну модель базового модуля перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій та діаграми його роботи. Наведено схему електричну принципovu та фізичну модель базового модуля перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій. Також у розділі наведено рекомендації з вибору конденсатора вторинної гілки перетворювача, параметри якого впливають на рівень пульсацій струму навантаження.

У загальних висновках авторкою представлені наукові та практичні результати дисертаційного дослідження та рекомендації щодо їх використання.

У додатках розміщено додаткові розрахунки елементів матриць, які не ввійшли до основного тексту, перелік публікацій авторки за темою дослідження та відомості про апробацію результатів роботи, відзнаки, які були отримані за результатами апробації дисертаційної роботи, та акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Дисертаційна робота повністю відповідає поставленій меті та відображає вирішення задач дослідження.

Обґрунтованість наукових положень. Новизна наукових положень підтверджується детальним аналізом літературних джерел, чисельними розрахунками, апробацією наукових положень та результатів дослідження у відповідних публікаціях та доповідях на наукових конференціях.

Дискусійні положення та зауваження. Позитивно оцінюючи здобутки авторки дисертації, необхідно звернути увагу на наступні дискусійні положення та зауваження до поданої роботи:

1. В анотації с.3 та 1 розділі с.38 авторка розглядає транзисторні перетворювачі з безперервним керуванням, у яких силові ключі працюють у лінійному діапазоні вольт-амперної характеристики, як альтернативу перетворювачам з імпульсним керуванням. Однак, варто зазначити, що в сучасних системах електроживлення вже давно використовуються перетворювачі саме з імпульсним керуванням, оскільки експлуатація силових ключів у неперервному режимі характеризується надзвичайно низьким ККД, про що, зрештою, зазначає і сама авторка дисертації.

2. Зниження точності формування струму навантаження при використанні імпульсних перетворювачів за рахунок значної інерційності перетворювача (про що зазначає авторка дисертації на с.39), усувається шляхом використання сучасної елементної бази як для силової частини (транзисторні ключі на основі SiC та GaN), так і для систем керування (високочастотні програмовані логічні інтегральні схеми FPGA/CPLD або цифрові сигнальні процесори DSP).

3. Дисертаційна робота виконана акуратно, текст роботи викладено грамотно, але мають місце окремі помилки, переважно, синтаксичні (неузгодженість членів речення), наприклад перше речення останнього абзацу с.2 або перший пункт наукової новизни (с.6, с.23), пропущені слова («форма та амплітуда імпульсу струму, проходить крізь деталі», с.48). Це дещо ускладнює розуміння змісту окремих речень та тверджень.

4. Дещо нелогічним виглядає використання одночасно і україномовних, і англійських індикаторів для основних змінних, що описують процеси в системі, наприклад, U_{in} (вхідна напруга) та R_n (опір навантаження); I_{out} (вихідний струм) та I_{reg} (струм регульованого модулю) та ін.

5. На с.22 зазначено «Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в перетворювачах електроенергії для контактного зварювання. Предметом дослідження є перетворювачі електроенергії для контактного зварювання». Формулювання об'єкта та предмета дослідження недосконале, оскільки об'єкт, відповідно до наведеного формулювання, є характеристикою предмета, в той час, як предмет має бути стороною об'єкта, на яку спрямовано фокус дослідження.

6. На с.48 авторка зазначає, що з підвищенням частоти роботи модуля зростатиме ККД, хоча насправді результат може бути протилежний: через збільшення динамічних втрат на перемикання (switching losses) ККД знизиться.

7. У розділі 2 основна увага від початку розгляду приділена понижуючим перетворювачам, однак, авторка не обґрунтовує в достатній мірі, чому саме не було приділено достатню увагу іншим топологіям, наприклад, перетворювачам з підвищенням напруги, або перетворювачам з підвищенням та зниженням

напруги, зокрема, квазі-імпедансним перетворювачам, які здатні забезпечувати високі значення вихідного струму та ККД.

8. В підрозділах 2.2 та 2.3, присвячених багатофазному понижуючому перетворювачу та понижуючому перетворювачу зі зниженим рівнем пульсацій вихідного струму, розглядаються топології з магніто-розв'язаними індуктивними елементами (рис. 2.11 с.65 та рис.2.13 с.68). Незрозумілим лишається, чи дійсно був відсутній магнітний зв'язок при експериментальній реалізації. Чому не розглядався варіант використання магніто-зв'язаних індуктивних елементів (coupled inductors) на спільному осерді? Таке рішення могло б ще більше знизити рівень пульсацій вихідного струму та покращити масогабаритні показники та ККД перетворювача.

9. В дисертаційній роботі не наведено достатнє обґрунтування щодо конкретних вибраних значень вхідної напруги понижуючого перетворювача. Так, на рис.2.7 та 2.8 (с.57) наведені характеристики для $U_{in} = 5$ В та $U_{in} = 12$ В, однак інші можливі значення вхідної напруги не розглядаються. В той же час, для побудови ЛАФЧХ на с.80 використовується вхідна напруга $U_{in} = 2.7$ В.

10. У 3 розділі, присвяченому розробці математичної моделі базового модуля, не приділено достатню увагу огляду інших існуючих напрацювань, зокрема, не розглянуті математичні моделі, розроблені іншими дослідниками для таких чи подібних перетворювачів. Оскільки розроблені авторкою моделі позиціонуються як елементи наукової новизни, відсутність такого порівняння знижує переконливість тверджень щодо новизни цих результатів.

11. На с.80 при обранні параметрів для побудови ЛАФЧХ не надано пояснень, чому використані саме такі значення вхідної напруги, номіналів пасивних елементів, коефіцієнту заповнення.

12. Враховуючи вираз (3.38) для передавальної функції перетворювача (с.79) та вигляд побудованої діаграми Боде (рис.3.4, с.81), що подібна до характеристик аперіодичної ланки, інтерес викликають конкретні числові значення нулів та полюсів передавальної функції. Чи можна знехтувати окремими її складовими з метою спрощення виразу для певних діапазонів значень пасивних елементів перетворювача?

13. На с.81 авторка зазначає «Також графік АФЧХ (діаграма Найквіста) (Рис. 3.5) показує, що система є стійкою, оскільки графік не охоплює точку $(-1;j0)$ ». Варто зазначити, що таке твердження є достовірним лише для одного конкретного набору значень параметрів, наведених на с.80. Щодо нескінченної множини всіх інших наборів значень параметрів такий висновок не має достатнього підтвердження. Відповідно, висновки 1 та 3 за розділом 3 на с.126-127 не можна вважати достатньо обґрунтованими в частині стійкості розімкненої системи.

14. Коректність схеми, зображеної на Рис. 3.9. Перетворювач з модульною структурою з n модулями (с.86), викликає сумніви, оскільки стік $Sn2$ та витік $Sn4$ мають однаковий потенціал та підключені до негативного полюса вхідного джерела напруги DC.

15. На с.87 авторка дисертації зазначає, що розглядається перетворювач з модульною структурою, який складається з трьох модулів, а застосована методика є універсальною саме для перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій та підходить для будь-якої кількості модулів перетворювача. Разом з тим, не наведено обґрунтувань, чому обрано саме таку кількість модулів ($n = 3$). Якими рекомендаціями слід керуватися розробнику системи при виборі необхідної кількості модулів? Чи існує оптимальна кількість модулів, яка задовольнятиме певні технічні вимоги?

16. На с.95 дисертації авторка робить припущення, що всі модулі ідентичні, а тому номінали конденсаторів, котушок індуктивності та їх опори будуть однаковими. Однак, в реальній системі ідентичності параметрів модулів досягти неможливо, а тому різниця номіналів пасивних елементів може призвести до значного спотворення форми вихідного струму, що негативно відіб'ється на якості технологічного процесу при контактному зварюванні.

17. Вибір параметрів схеми, що були використані під час імітаційного моделювання (розділ 4, с.128) не має достатніх обґрунтувань.

18. На Рис. 4.6. Реалізований випробувальний стенд для проведення вимірювань (с.135) не вказано позначення складової №4 випробувального стенду, відповідно до переліку на с.134.

19. На рис. 4.10 та 4.13 зображено діаграми роботи транзисторів, зокрема, ШІМ сигнал керування та напруги стік-витік транзисторів, однак не вказано, для яких саме транзисторів наведені сигнали. З рисунків видно, що в моменти вимикання імпульсу керування напруга стік-витік на транзисторах має значні пікові викиди, що навіть перевищують амплітуду робочого імпульсу. З чим пов'язане таке явище і чи можливо його уникнути?

20. На с.140 авторка дисертації зазначає, що під час розробки прототипу перетворювача було обрано плівковий конденсатор С2 з поліетилентерефталату (РЕТ) МКТ1822 ємністю 10 мкФ та активним опором 65 мОм. Чому при виборі конденсатора не було враховано тангенс кута діелектричних втрат $\tan \delta$? Для фторопластових або полікарбонатних конденсаторів його значення може бути на порядок менше, ніж для поліетилентерефталевих.

Зазначені зауваження дещо знижують загальне враження щодо змісту рукопису дисертації. Однак, в цілому дисертаційне дослідження виконано на високому науковому рівні та справляє позитивне враження.

Загальні висновки за дисертаційним дослідженням. Дисертація Карбівської Тетяни Олексіївни «Перетворювачі електроенергії з модульною структурою та зниженим рівнем пульсацій для контактного зварювання» є самостійною завершеною науково-дослідницькою роботою, в якій отримано нові наукові результати, важливі для розвитку принципів побудови перетворювачів електричної енергії для контактного зварювання в частині забезпечення високих показників енергоефективності та точності формування зварювального струму. Результати, отримані здобувачкою, мають істотне значення для предметної області спеціальності 171 – Електроніка, зокрема, в частині побудови транзисторних перетворювачів електроенергії зі зниженим рівнем пульсацій. Актуальність обраної теми дисертації, достатній рівень новизни та повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій, рівень та кількість опублікованих наукових праць повною мірою відповідають вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня «доктор філософії». Оформлення дисертаційної роботи відповідає вимогам Наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

Дисертаційна робота Карбівської Тетяни Олексіївни «Перетворювачі електроенергії з модульною структурою та зниженим рівнем пульсацій для контактного зварювання», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії, відповідає вимогам пунктів 9-12 «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167 із змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 979 від 21.10.2020 та № 608 від 09.06.2021. Авторка дисертаційної роботи Карбівська Тетяна Олексіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 Електроніка.

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук, доцент,
провідний науковий співробітник
навчально-наукового інституту
електронних та інформаційних технологій
Національного університету
«Чернігівська політехніка» МОН України



С.А. Степенко



Підпис засвідчую

Головний фахівець
Відділу кадрів
«03» 12 2021 р.