

АНОТАЦІЯ

Карбівська Т.О. Перетворювачі електроенергії з модульною структурою та зниженим рівнем пульсацій для контактного зварювання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 – Електроніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню перетворювачів електроенергії з модульною структурою та зниженим рівнем пульсацій для контактного зварювання.

Контактне зварювання широко застосовується для з'єднання металевих деталей в електронній промисловості, приладобудуванні, машинобудуванні, автомобіле- та літакобудуванні, космічній техніці, медицині та інших галузях.

Контактне зварювання здійснюється шляхом затискання двох металевих деталей між двома електродами з необхідною силою стиснення та пропускання крізь них імпульсу електричного струму необхідної форми, амплітуди та тривалості. У місці проходження струму деталі нагріваються до рівня температури плавлення та з'єднуються між собою. Такий процес зварювання є досить складним, оскільки електричний опір зони зварювання має складний, нелінійний характер та залежить від матеріалу, товщини і шорсткості поверхні деталей та електродів. Такі властивості контактного зварювання ускладнюють процес проектування джерел живлення для його реалізації.

В більшості випадків основною і єдиною вимогою, що виставляється до зварних з'єднань – їх міцність. Однак є галузі промисловості, де з'єднуються деталі відповідального призначення і відсутність виплесків часточок розплавленого металу, а також висока повторюваність відтворення параметрів зварних точок має критично важливе значення. Вимога до відсутності виплесків при зварюванні мініатюрних деталей, або деталей компонентів відповідального призначення пов'язана з тим, що часточки металу, які застигли

після процесу зварювання, можуть викликати короткі замикання в функціональних елементах електронних приладів, спотворення сигналів, шуми і т.п. Висока повторюваність з'єднань необхідна під час виготовлення складних виробів, за наявності великої кількості зварних точок, від якості кожної з яких значною мірою залежить якість готового виробу.

Основне завдання формування необхідних для зварювання параметрів покладається на джерело живлення (також відоме як формувач імпульсів струму), яке забезпечує необхідну форму, амплітуду та тривалість імпульсу зварного струму. На практиці використовують різні форми імпульсів зварного струму, наприклад імпульси постійного чи змінного струму, імпульси пульсуючого струму, або ж комбінації вищезгаданих форм імпульсів струму. Використання імпульсів постійного струму дозволяє покращити якість отриманих з'єднань, особливо у випадках зварювання мініатюрних деталей. Ряд досліджень показує, що при зварюванні деталей товщиною до 0,5 мм, важливу роль відіграє рівень пульсацій зварного струму. Малий розмах пульсацій дозволяє отримати зварні з'єднання високої міцності без виплесків металу. Також додаткові елементи фільтрів для зниження пульсацій струму вносять значну інерційність в контур зворотного зв'язку, що може погіршити якість роботи системи керування та відобразитися на точності відтворення струму.

На сьогоднішній день відома велика кількість способів побудови джерел живлення для контактного зварювання. Найбільш перспективним вбачається побудова джерела живлення на базі транзисторного перетворювача, який здатний забезпечити високу точність формування струму в навантаженні, а також вищий рівень енергоефективності порівняно з іншими видами джерел живлення. Відомо, що транзисторні перетворювачі з безперервним керуванням дозволяють отримати високу точність відтворення кривої зварювального струму, однак забезпечують досить низьку енергоефективність. Транзисторні перетворювачі з імпульсним керуванням забезпечують більш високий коефіцієнт корисної дії, однак точність формування струму на виході знижується. Дещо знизити потужність втрат одночасно зі збереженням високої

точності формування струму дозволяє використання перетворювачів зі спільним використанням безперервного та імпульсного режимів керування транзисторами. Однак для подібних рішень питання поліпшення показників енергоефективності все ще залишається актуальним. Використання понижуючого перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій, що працює в імпульсному режимі, дозволить забезпечити високу точність формування зварювального струму одночасно з низькою потужністю втрат, властивою транзисторним перетворювачам з імпульсним керуванням.

Використання модульного способу побудови джерела живлення з n уніфікованими модулями перетворювачів, що підключені паралельно та працюють на спільне навантаження, дозволить покращити точність формування струму, підвищити рівень потужності в навантаженні без використання громіздких компонентів, а також технологічність, гнучкість перебудови та рівень уніфікації перетворювача.

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, які дозволяють виконати побудову більш енергоефективних та надійних джерел живлення для контактного зварювання, обґрунтовано вибір модульної топології перетворювача.

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. У розділі наведено формули, які описують процеси у транзисторних перетворювачах, а також проілюстровано діаграми їх роботи. Обґрунтовано вибір перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій як базового модуля джерела живлення для контактного зварювання, в якому використання додаткового конденсатора дозволяє знизити рівень пульсацій струму навантаження.

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. Крім того, наведено логарифмічні амплітудно-фазові частотні характеристики перетворювачів, що демонструють їх роботу та запаси стійкості.

У четвертому розділі наведено імітаційну модель базового модуля перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій та діаграми його роботи. Також наведено схему електричну принципову та фізичну модель базового модуля перетворювача зі зниженим рівнем пульсацій. Імітаційне моделювання та результати практичних досліджень підтверджують висунуті припущення про значне зниження рівня пульсацій струму на виході перетворювача. Також у розділі наведено рекомендації з вибору конденсатора вторинної гілки перетворювача, параметри якого впливають на рівень пульсацій струму навантаження.

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

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше показано, що 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 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.

Практичне значення отриманих результатів дисертації:

1. Розроблена схема електрична принципова одного 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. Відхилення сформованого струму навантаження від заданого не перевищило 3%.

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.

Ключові слова: перетворювач електроенергії, модульна структура, пульсації струму, контактне зварювання, формувач імпульсів струму, математична модель.

SUMMARY

Tetiana Karbivska Modular Power Converters with Low Ripple Level for Resistance Welding Application. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Philosophy Doctor, in specialty 171 “Electronics”. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the research of electric power converters with modular structures and reduced ripple levels for resistance welding.

Resistance welding is widely used for joining metal parts in the electronics industry, instrumentation, mechanical engineering, automotive and aircraft construction, space technology, medicine, and other industries.

Resistance welding is carried out by clamping two metal parts between two electrodes with the required compression force and passing through them a pulse of electric current of the desired shape, amplitude, and duration. At the point of current flow, the parts are heated to the melting point and connected to each other. The welding process is quite complex because the electrical resistance of the welding zone is complex, nonlinear, and depends on the material, thickness, and surface roughness of parts and electrodes. Such properties of resistance welding complicate the process of designing power supplies for its implementation.

In most cases, the strength of welded joints is the main and only requirement. However, there are industries where precision miniature parts have to be connected, and the absence of splashes of molten metal particles, as well as the high frequency of reproduction of weld point parameters, is critical. The requirement to avoid splashes when welding miniature parts or parts of responsible components is due to the fact that metal particles that have hardened after the welding process can cause short circuits in the functional elements of electronic devices, signal distortion, noise, etc. High repeatability of joints is necessary for the manufacture of complex products while performing a large number of welds, which predominantly affects the quality of the finished product.

A power supply (also called current pulse shaper) is supposed to provide the necessary parameters for welding – the required shape, amplitude, and pulse duration of the weld current. In practice, various shapes of weld current pulses are used, such as DC or AC pulses, pulsating current pulses, or a combination of the above-mentioned current pulse shapes. The use of DC pulses can improve the quality of the connections, especially in the case of welding miniature parts. A number of studies show that the level of weld current ripples plays a significant role when welding parts up to 0.5 mm thick. The small amplitude of the ripples allows obtaining high-strength welded joints without metal splashes. Also, additional filter elements to reduce current ripple bring significant inertia to the feedback loop, which can degrade the quality of the control system and affect the accuracy of current reproduction.

To date, there are many ways to build power supplies for resistance welding equipment. The most promising is the construction of a power supply based on a transistor converter, which is able to provide high accuracy of the current generation in the load, as well as a higher level of energy efficiency compared to other types of power supplies. It is known that transistor converters with continuous control allow obtaining high accuracy of the reproduction of the welding current curve, but provide fairly low energy efficiency. Pulse-controlled transistor converters provide higher efficiency, but the accuracy of the output current is reduced. The use of converters with the joint use of continuous and pulse transistor control modes allows reducing the power loss at the same time while maintaining the high accuracy of the current generation. However, for such solutions, the issue of improving energy efficiency remains relevant. The use of a step-down converter with low ripple, operating in pulse mode, will provide high accuracy of welding current generation at the same time with low power loss, inherent in transistor converters with pulse control.

The use of a modular topology of a power supply with n unified converter modules connected in parallel and working for a common load will improve the accuracy of the current generation, increase the power level in the load without the use of bulky components, as well as increase manufacturability, flexibility, and unification of the converter.

In the introduction the relevance of the chosen research topic is substantiated, the purpose and tasks of scientific researches are formulated, data on connection of work with scientific programs are resulted, scientific novelty, practical value is stated and data on approbation of dissertation results and publications are given.

The first section reveals the features of the process of resistance welding, an analytical review of scientific publications to study existing technical solutions and principles of constructing power supplies for resistance welding, the choice of a transistor converter using the pulse control method of transistors is substantiated. The construction features of converters with a modular structure, which allows building more energy-efficient and reliable power supplies for resistance welding, are also revealed, the choice of the modular topology of the converter is substantiated.

The second section considers topologies of transistor converters that can be used as a basic module of power supply with modular structure for resistance welding. The energy efficiency of transistor converters during operation on pulse load with high current amplitude, typical for resistance welding, is estimated. The section presents formulas that describe the processes in transistor converters, as well as illustrate diagrams of their operation. The choice of the converter with the reduced ripple level as the basic module of the power supply for resistance welding in which use of the additional capacitor allows to reduce the ripple level in load current is substantiated.

In the third section, the mathematical models of the basic converter module with the reduced ripple level and the converter consisting of n unified modules with the reduced ripple level are built. It is shown that the converter model with a modular structure for resistance welding and low ripple is universal and can be used for the n number of basic modules operating for a common load. In addition, the Bode plots for the converters are demonstrated, showing their operation and stability margins.

The fourth section presents a simulation model of the basic converter module with a reduced ripple level and diagrams of its operation. The circuit diagram and physical model of the basic converter module with the reduced ripple level are also shown. Simulation modeling and the results of practical research confirm the

assumptions about a significant reduction in the level of current ripple at the output of the converter. The section also provides recommendations for choosing a capacitor in the secondary branch of the converter, the parameters of which affect the level of load current ripple.

In the general conclusions, the author presents the scientific and practical results of the thesis research and recommendations for their use.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. It is shown for the first time that the use of the topology of the converter for resistance welding in which by adding a link to compensate for load current ripple and the use of a modular topology provides high energy efficiency and accuracy of current pulses.

2. For the first time, a mathematical model of one converter module with modular structure and low ripple level was built, which takes into account the parasitic resistances of circuit elements, allows to analysis dynamic characteristics and determine acceptable from a practical point of view parameters of controller settings.

3. For the first time, a mathematical model of the converter for any number of modules was built, which allows to perform the analysis of its dynamic characteristics and to determine the practically acceptable parameters of the controller settings.

4. The technique of synthesis of the regulator which is based on the offered model of one module of the converter and allows to receive basic settings of the regulator and by gradual approximation to provide its parameters acceptable from the practical point of view is improved.

The practical significance of the results of the thesis:

1. The electrical circuit of one module based on the proposed topology of the converter with an additional link to compensate load current ripple, as well as an experimental sample of the converter with low ripple level for resistance welding, which can be used in the construction of power supplies for resistance welding and other applications, when the accuracy of the output current is important provided that

the power loss is minimized, was developed. The deviation of the generated load current from the set did not exceed 3%.

2. The simulation model of one converter module with low ripple for resistance welding, which can be used by developers in the design of power supplies for resistance welding with n -modules, when the accuracy of the output current is important while minimizing power loss and flexibility in changing the power supply configuration, was developed.

3. The technique of calculation of losses in the pulse step-down converter for resistance welding taking into account losses on inductive elements of the circuit which can be used during designing is improved.

Key words: electric power converter, modular structure, current ripple, resistance welding, current pulse shaper, mathematical model.

Список публікацій здобувача

1. O. Bondarenko *et al.*, “Modular Power Supply for Micro Resistance Welding,” *Electr. Control Commun. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 20–26, Jul. 2017, doi: 10.1515/ессе-2017-0003 (Закордонне періодичне видання, Латвія, індексується в Web of Science).
2. О. Ф. Бондаренко, Т. О. Рижаківа, та Ю. В. Кожушко, “Вдосконалена методика оцінки втрат в імпульсних перетворювачах установок контактного мікрозварювання,” *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 3, ст. 38–42, 2018, doi: 10.15222/ТКЕА2018.3.38 (Фахове видання).
3. Т. О. Карбівська, Ю. В. Кожушко, та О. Ф. Бондаренко, “Аналіз потужності втрат джерела живлення для контактного мікрозварювання,” *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, vol. 25, №. 3, ст. 41–47, грудень 2020, doi: 10.20535/2523-4455.mea.208874 (Фахове видання).
4. Y. Kozhushko, T. Karbivska, D. Zinchenko, D. Pavković, E. Rosolowski, and O. Bondarenko, “Charging Device of Capacitive Energy Storage for Micro Resistance Welding,” *Present Probl. Power Syst. Control*, vol. 9, pp. 5–17, 2018 (Закордонне періодичне видання, Польща).
5. О. Ф. Бондаренко, Ю. В. Кожушко, Т. О. Карбівська, Є. О. Желязков, та П. С. Сафонов, “Стійкість комбінованої системи накопичення енергії на основі суперконденсатора та акумуляторної батареї,” *Електротехніка і Електромеханіка*, № 5, ст. 31–37, жовтень 2020, doi: 10.20998/2074-272X.2020.5.05 (Індексується в Web of Science, фахове видання категорії А).
6. Ю. В. Кожушко, О. Ф. Бондаренко, Д. О. Зінченко, та Т. О. Рижаківа, “Ефективне використання гібридного ємнісного накопичувача енергії джерела живлення для контактного мікрозварювання,” *Мікросистеми Електроніка та Акустика*, vol. 23, № 2, ст. 14–18, квітень 2018, doi: 10.20535/2523-4455.2018.23.2.130391 (Фахове видання).
7. Y. Kozhushko, D. Pavkovic, T. Karbivska, P. Safronov, and O. Bondarenko, “Robust Control of Battery-Supercapacitor Energy Storage System

Using Kharitonov Theorem,” in 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Jul. 2020, pp. 550–555, doi: 10.1109/CPE-POWERENG48600.2020.9161569 (Закордонне періодичне видання, Португалія, індексується в Scopus).

8. O. Bondarenko, T. Ryzhakova, and Y. Kozhushko, “Power Supply with Modular Structure for Micro Resistance Welding,” in *16th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology III»*, 2017, pp. 2–5.

9. T. Karbivska and Y. K. O. Bondarenko, “Evaluation of The Total Losses in Principal Units of Micro Resistance Welding Machine Power Supplies,” in *18th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering» and «Doctoral School of Energy and Geotechnology III»*, 2019, pp. 215–216.

10. T. Karbivska, Y. Kozhushko, J. G. Nataraj Barath, and O. Bondarenko, “Split-Pi Converter for Resistance Welding Application,” *2020 IEEE KhPI Week Adv. Technol. KhPI Week 2020 - Conf. Proc.*, pp. 391–395, 2020, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250113.

11. Y. Kozhushko, D. Pavkovic, T. Karbivska, and O. Bondarenko, “Stability Analysis of Battery-Supercapacitor Energy Storage System for Resistance Welding,” in 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Jul. 2019, pp. 349–354, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879850.

12. Y. Kozhushko, D. Pavkovic, D. Zinchenko, T. Karbivska, V. Sydorets, and O. Bondarenko, “Hybrid Energy Storage System of Power Supply for Micro Resistance Welding,” in 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Apr. 2019, pp. 584–589, doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783890.

13. Y. Kozhushko, T. Ryzhakova, O. Bondarenko, and Z. Stević, “Supercapacitor Battery Charger with Voltage Equilizing,” in *Međunarodna*

konferencija o obnovljivim izvorima električne energije, Oct. 2017, doi: 10.24094/mkoiee.017.1.5.127.

14. Y. Kozhushko, T. Karbivska, D. Pavkovic, and O. Bondarenko, “Peak Current Control of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage,” in 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Oct. 2020, pp. 396–401, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250086.

15. Т. О. Карбівська, Ю. В. Кожушко, та О. Ф. Бондаренко, “Вдосконалена методика оцінки втрат в імпульсних перетворювачах установок контактного мікрозварювання,” XIV Міжнародна конференція Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018), 2018, ст. 67.

16. Т. О. Рижакова та Ю. В. Кожушко, “Енергоефективність формувача імпульсів струму для контактного мікрозварювання,” X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених “Електроніка-2017,” 2017, ст. 55–58.

17. Т. О. Рижакова, “Формувач імпульсів для контактного зварювання з багатокомірковою структурою” VIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2015», 2015, ст. 202–204.

18. Т. О. Рижакова, “Зниження потужності втрат в імпульсному перетворювачі постійної напруги першого роду,” IX Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2016», 2016, ст. 314–317.

19. R. Baraniuk, T. Ryzhakova, Y. Kozhushko and O. Bondarenko, “Thermal and Surge Current Protection Means for Semiconductor Non-Isolated Power Converters,” in IEEE Standards Education e-Magazine, March 2018, vol. 8(1) (5G & 802.11).

20. Є. О. Желязков, Ю. В. Кожушко, Т. О. Карбівська, та О. Ф. Бондаренко, “Покращення характеристик безпровідних зарядних пристроїв для медичних застосувань,” XXI міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології» («СІЕТ–2020) 25-29 травня 2020 року, 2020, ст. 50–51.