

ІМПУЛЬСНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ З ЛАНКОЮ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ В БЕЗПЕРЕРВНОМУ РЕЖИМІ

Є.В. Вербицький*, О.Ф. Бондаренко**, Ю.В. Бондаренко***, В.О. Діденко****

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: bondarenkoaf@gmail.com

Запропоновано топологію імпульсного джерела живлення установки контактної мікрозварювання з ланкою регулювання потужності в безперервному режимі, де основну частину вихідної потужності генерує імпульсний перетворювач, а лінійний перетворювач на порядок меншої потужності компенсує його пульсацію. Створено математичні моделі основних вузлів схеми. За допомогою імітаційного моделювання підтверджено високу точність формування зварювальних імпульсів джерелом живлення. Показано, що пульсація потужності в навантаженні зменшилася більше ніж у 5 разів при збереженні високого ККД джерела. Бібл. 5, рис. 5.

Ключові слова: контактне мікрозварювання, імпульсне джерело живлення, безперервний режим керування, модульна структура.

Вступ. Зварювання є надійним способом нероз'ємного з'єднання матеріалів, який широко використовується у виробництві. Одним із найбільш високотехнологічних видів зварювання є контактне зварювання, що застосовується як для створення металевих конструкцій, так і для з'єднання живих тканин в хірургії. Контактне зварювання здійснюється пропусканням електричного струму значної амплітуди через деталі, стиснуті в місці з'єднання електродами. Для отримання якісного з'єднання (без виплесків та непроварів) електричні параметри зварювальних імпульсів (струм, напруга або потужність) мають змінюватися впродовж зварювання у відповідності до заданих законів та узгоджуватися з програмою стиснення електродів [1, 4]. Особливо критичною точністю відтворення заданих законів зміни зварювальних імпульсів є для контактної мікрозварювання, де розміри зварюваних деталей не перевищують 0,5 мм. Також у зв'язку з винятковою прецизійністю технології при контактному мікрозварюванні рекомендовано здійснювати регулювання зміни потужності зварювальних імпульсів, оскільки саме таким чином можливо найбільш ефективно контролювати введення енергії в навантаження [3, 4].

З метою досягнення максимальної точності формування короткотривалих зварювальних імпульсів із необхідними параметрами в контактному мікрозварюванні використовують транзисторні перетворювачі з безперервним керуванням, які мають високі динамічні властивості. Однак відомо, що ККД перетворювачів з такою топологією не перевищує 10–20 %. Використання імпульсних транзисторних перетворювачів, які мають значно кращий ККД, не дає можливості через їхню інерційність забезпечити точність формування зварювальних імпульсів, співставну з точністю, що гарантують лінійні перетворювачі.

Перспективним напрямком у проектуванні джерел живлення для контактної мікрозварювання можна вважати спільне використання імпульсних та безперервних режимів роботи транзисторних перетворювачів, за рахунок чого можливо досягти як задовільного ККД, так і достатньої точності регулювання параметрів зварювальних імпульсів. Відомі рішення [2], які реалізують цей принцип і полягають у побудові джерела живлення у вигляді модульної (багатокоміркової) структури, де кожний уніфікований модуль містить імпульсну та безперервну частини. При цьому імпульсні частини модулів забезпечують основний рівень зварювального струму, а безперервні виконують високоточне дорегулювання для забезпечення його необхідної форми згідно з заданим законом. Перевагою такого рішення є повна уніфікація структури перетворювача, оскільки всі модулі є ідентичними, проте йому властивий і суттєвий недолік – висока складність схемної реалізації та алгоритму керування.

Простішою альтернативою вказаному рішенню може бути додавання до загалом імпульсного перетворювача однієї ланки безперервного керування, яка виконуватиме таку саму функцію дорегулювання струму (потужності) до отримання заданої форми зварювального імпульсу в навантаженні.

Мета даної роботи – досягти високої точності регулювання параметрів зварювальних імпульсів при збереженні задовільного ККД шляхом реалізації схемної топології, яка втілює принцип використання ланки регулювання потужності в безперервному режимі спільно з імпульсним перетворювачем, для побудови джерела живлення установки контактної мікрозварювання.

Структура джерела живлення. Головним вузлом джерела живлення є вихідний формувач зварювальних імпульсів, відповідальний за відтворення у навантаженні необхідної форми кривої струму (напруги або потужності). Формувач споживає енергію з мережі або від блоку автономного живлення. В першому випадку задля досягнення кращих показників електромагнітної сумісності з мережею в структурі джерела живлення передбачають ємнісний енергонакопичувач, який має забезпечувати необхідну енергію впродовж мінімум одного циклу зварювання.

© Вербицький Є.В., Бондаренко О.Ф., Бондаренко Ю.В., Діденко В.О., 2018

*ORCID ID: [*https://orcid.org/0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152) ; **<https://orcid.org/0000-0002-4276-1145> ;

*** <https://orcid.org/0000-0002-1803-0684> ; **** <https://orcid.org/0000-0003-2091-2069>

На рис. 1, а в загальному вигляді показано схемну топологію формувача зварювальних імпульсів, що пропонується, на рис. 1, б – ідеалізовані часові діаграми формування імпульсу потужності заданої форми $p_{em}(t)$. Інформаційні сигнали показано тонкими лініями, силові – потовщеними. Для зменшення питомої потужності складових, підвищення надійності роботи та забезпечення широкого діапазону регулювання вихідних параметрів імпульсний перетворювач організовано за модульним принципом.

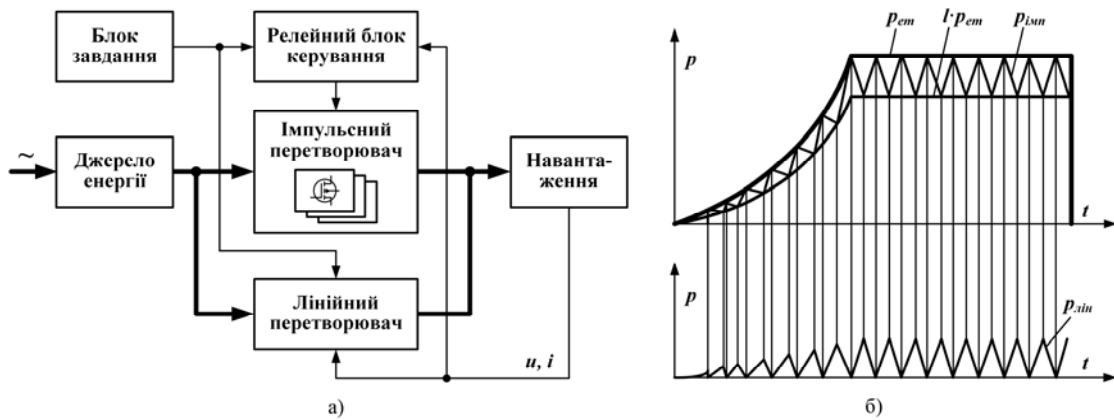


Рис. 1

Керування формувачем імпульсів здійснюється наступним чином. У релейному блоці керування формуються порогові значення вихідної потужності, що використовуються для керування імпульсним перетворювачем. Верхній поріг задається значенням $p_{em}(t)$, нижній – $l \cdot p_{em}(t)$, де $0 \leq l < 1$. Лінійний перетворювач генерує потужність p_{lin} , що дорівнює різниці еталонної потужності p_{em} і потужності імпульсного перетворювача p_{im} . Такий підхід теоретично дає можливість повністю усунути пульсацію потужності на навантаженні та відповідно помилку формування зварювального імпульсу. Для цього лінійний перетворювач повинен генерувати струм, протифазний пульсації імпульсного перетворювача. Оскільки в даному випадку доцільно використовувати закони регулювання, що базуються на параметрах перетворювача, опишемо математичну модель лінійного перетворювача.

Математична модель лінійного перетворювача. Модель лінійного перетворювача слід розглядати як сукупність моделей вхідного джерела енергії, силової частини перетворювача та навантаження. Для отримання моделей вказаних складових часо-залежності потужності в навантаженні можна записати у вигляді ряду Тейлора

$$p(t) = \sum_{k=0}^{n-1} c_k \cdot t^k, \quad (1)$$

де c – константа, t – час, k – показник степеня, n – кількість членів ряду для опису кривої потужності.

Для опису зварювального контакту достатньо, як правило, розглядати його як параметричний лінійний активний опір $R(t)$, який на періоді роботи імпульсного перетворювача можна вважати постійним

$$R(t) = R_z, \quad (2)$$

де z – номер періоду роботи перетворювача.

Зважаючи на це, для описання моделі перетворювача доцільно розглянути лише один член ряду (1) та використати метод суперпозиції. З урахуванням (2) струм і напруга на контакті $i_H(t)$ і $u_H(t)$ описуються формулами

$$i_H(t) = \sqrt{p(t)/R(t)} = c_k^{0.5} t^{k/2} R_z^{-0.5}; \quad u_H(t) = \sqrt{R(t) \cdot p(t)} = c_k^{0.5} t^{k/2} R_z^{0.5}. \quad (3)$$

У випадку використання лінійного перетворювача послідовного типу його вихідний струм $i_H(t)$ дорівнює його вхідному струму $i_{BX_Л}(t)$.

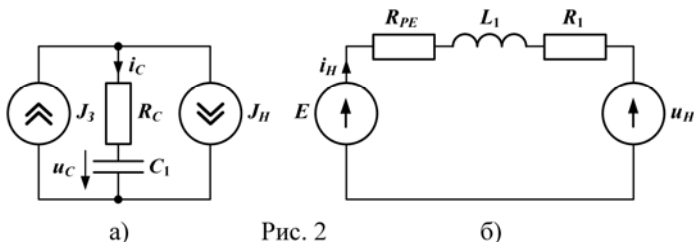


Рис. 2

Вхідним джерелом енергії в даній системі є накопичувач на суперконденсаторах, модель якого включає джерело зарядного струму J_3 , модель суперконденсатора з ємністю C_1 і вихідним опором R_C та джерело струму навантаження J_H (рис. 2, а). За умови, що падіння напруги U_{Rc} є значно меншим напруги на конденсаторі u_c і зменшення напруги на конденсаторі ΔU_C впродовж періоду роботи перетворювача є несуттєвим, напругу на конденсаторі впродовж періоду роботи імпульсного перетворювача можна вважати постійною: $u_c = E$. Тоді модель лінійного перетворювача може бути спрощена до варіанта на рис. 2, б і включатиме джерело E , опір R_1 та індуктивність L_1 дротів, параметричний опір регульовального елемента R_{PE} та джерело напруги u_H , що представляє навантаження.

Диференціальне рівняння (4), що описує струм навантаження i_H ,

$$L_1 di_H / dt = E - U_H(t) - i_H \cdot (R_1 + R_{PE}(t)) = E - c_k^{0.5} t^{k/2} R_z^{0.5} - i_H \cdot (R_1 + R_{PE}(t)), \quad (4)$$

є базовим для керування регульовальним елементом. Воно може бути вирішене за умови, що параметри вихідного струму лінійного перетворювача є відомими.

Моделювання роботи джерела живлення. Принцип роботи джерела живлення показано на прикладі формування в навантаженні кривої потужності, що задається рівнянням

$$p(t) = \begin{cases} c \cdot t^n, & 0 \leq t < t_1; \\ P_-, & t_1 \leq t \leq t_2, \end{cases} \quad (5)$$

де $n = 2$, $c = 2 \cdot 10^9$, $P_- = 2000$ Вт, $t_1 = 10^{-3}$ с, $t_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ с.

Характер зміни опору зварювального контакту описано у роботі [5]. На рис. 3 показано суміщені у часі діаграми опору контакту і потужності зварювального імпульсу. Опір контакту спрощено представлено кусково-лінійною функцією. У початковий момент часу через наявність шорсткостей, мікрозабруднень та оксидної плівки на поверхнях зварюваних деталей площа електричного контакту між ними є незначною, а його опір має невизначену величину. Внаслідок протікання струму відбувається руйнування поверхневої плівки і плавлення металу в точках контакту, при цьому площа контакту збільшується, а його опір зменшується приблизно на порядок (ділянка I). Далі відбувається об'ємне нагрівання матеріалу, внаслідок чого його температура і опір зростають (ділянка II). Під дією нагрівання матеріал стає пластичним, що сприяє подальшому збільшенню площі контакту та зменшенню опору (ділянка III).

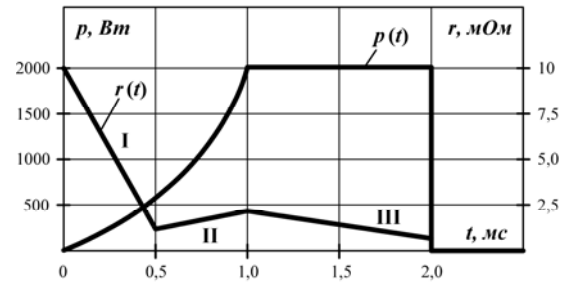


Рис. 3

У середовищі MATLAB Simulink складено імітаційну модель імпульсного джерела живлення з ланкою лінійного регулювання, де як модель навантаження застосовано функцію зміни опору контакту, показану на рис. 3. Модель імпульсного перетворювача включає чотири уніфіковані модулі на основі понижувальної топології. Значення згладжувальної індуктивності дорівнює 1 мкГн, величина опору втрат – 0,1 мОм. Порогові значення потужності у навантаженні: $0,82p(t)$ і $p(t)$ з пульсацією 0,18

(t). Лінійний перетворювач підключається паралельно до імпульсного. Вхідна напруга імпульсного перетворювача задана рівною 15 В, лінійного перетворювача – 5 В.

Якщо вважати форму пульсації струму імпульсного перетворювача трикутною, а опір контакту на періоді роботи імпульсного перетворювача постійним, принцип керування лінійним перетворювачем значно спрощується. Для його реалізації необхідно: фіксувати моменти комутації ключів перетворювача t_z ; вимірювати опір контакту $R_c(t_z)$; вимірювати граничні значення вихідного струму імпульсного перетворювача в моменти t_z : $I_{imn_max}(t_z)$ і $I_{imn_min}(t_z)$; розраховувати необхідну швидкість спадання ΔI_- і зростання ΔI_+ струму лінійного перетворювача для компенсації пульсації струму імпульсного перетворювача (див. формулу (6)); формувати струм лінійного перетворювача на кожному наступному періоді роботи імпульсного перетворювача з нахилом, розрахованим згідно з (6)

$$\Delta I_-(z) = -\frac{I_{imn_max}(t_z) - I_{imn_min}(t_{z-1})}{t_z - t_{z-1}} + \frac{di_H}{dt}; \quad \Delta I_+(z) = -\frac{I_{imn_min}(t_z) - I_{imn_max}(t_{z-1})}{t_z - t_{z-1}} + \frac{di_H}{dt}. \quad (6)$$

Лінійну форму струму відповідно до (3) можна отримати при $k = 2$. Підставляючи у (4) аналітичне значення струму перетворювача $i = i_{maxz} - \Delta I_+(t - t_z)$ для інтервалу спадання та $i = \Delta I_-(t - t_z)$ для інтервалу наростання і розв'язуючи диференціальне рівняння, отримаємо відповідно

$$R_{PE-}(t) = \frac{E - c^{0.5} R_z^{0.5} t - \Delta I_-(t - t_z) R_1 - L_1 \Delta I_-}{\Delta I_-(t - t_z)} + \frac{E - c^{0.5} R_z^{0.5} t - i_{max} R_1}{i_{max}}; \quad R_{PE+}(t) = \frac{E - c^{0.5} R_z^{0.5} t - \Delta I_+(t - t_z) R_1 - L_1 \Delta I_+}{\Delta I_+(t - t_z)}. \quad (7)$$

Очевидно, що для формування пульсації струму з позитивним нахилом $\Delta I_+ > 0$ має бути $E > 0$, а для формування пульсації з негативним нахилом $\Delta I_- < 0$ має бути $E < 0$. Тому для реалізації моделі лінійного перетворювача обрано реверсивну топологію (рис. 4). Вхідна ємність C_2 є накопичувачем енергії, інвертор на транзисторах VT_3 - VT_6 інвертує полярність напруги на конденсаторі C_2 , і водночас VT_4 і VT_6 виконують роль елементів регулювання за позитивної та негативної полярності напруги на конденсаторі C відповідно.

Криві еталонної потужності, потужності на виході імпульсного перетворювача і сумарної потужності з урахуванням внеску лінійного перетворювача показано на рис. 5. Результати моделювання свідчать, що пульсація потужності в результаті використання лінійного перетворювача зменшилася більше ніж у 5 разів: з 320 Вт до 60 Вт. При цьому ККД перетворювального блоку залишився майже на рівні імпульсного перетворювача, оскільки вихідна потужність лінійного перетворювача більше ніж у 10 разів менша ніж потужність імпульсного.

Висновки. Результати моделювання підтвердили ефективність імпульсного джерела живлення для контактного мікрозварювання, побудованого згідно з запропонованою топологією, де основну частину вихідної потужності генерує імпульсний перетворювач, а лінійний перетворювач на порядок меншої потужності компенсує його пульсацію. Завдяки цьому пульсація потужності зменшилася більше ніж у 5 разів при збереженні високого ККД.

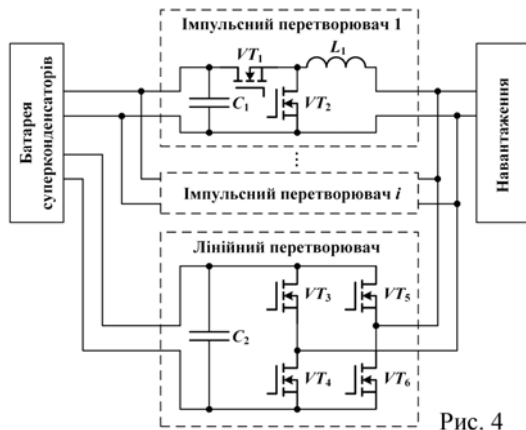


Рис. 4

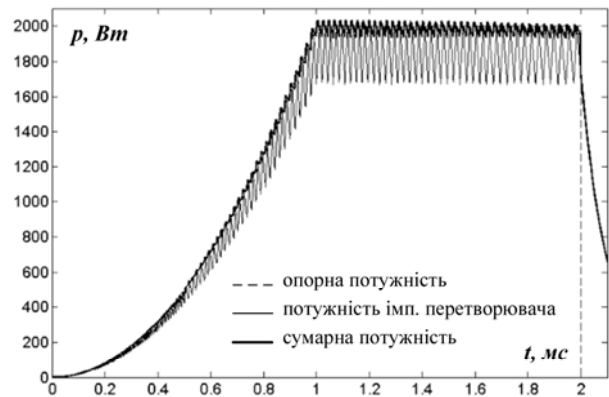


Рис. 5

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ № 0116U006924).

1. Атауш В.Е., Леонов В.П., Москвин Э.Г. Микросварка в приборостроении. Рига: РТУ, 1996. 332 с.
2. Бондаренко Ю.В., Сидорець В.М., Сафронов П.С., Бондаренко О.Ф. Оцінка точності регулювання струму багатокоміркового транзисторного перетворювача з комбінованим керуванням. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 67-68.
3. Brown L.J., Lin J. Power Supply Designed for Small-Scale Resistance Spot Welding. *Welding Journal*. 2005. Vol. 84. No 7. Pp. 32-36. URL: <https://app.aws.org/wj/2005/07/032>.
4. Salem M. Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW). Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 130. University of Western Ontario, 2011. URL: <http://ir.lib.uwo.ca/etd/130>.
5. Wang S.C., Wei P.S. Modeling Dynamic Electrical Resistance During Resistance Spot Welding. *Journal of Heat Transfer*. 2001. No 3 (123). Pp. 576-585.

УДК 621.314:621.791

ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ СО ЗВЕНОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ

Е.В. Вербицкий, А.Ф. Бондаренко, Ю.В. Бондаренко, В.А. Диденко

НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

e-mail: bondarenkoaf@gmail.com

В работе предложена топология импульсного источника питания установки контактной микросварки со звеном регулирования мощности в непрерывном режиме, где основную часть выходной мощности генерирует импульсный преобразователь, а линейный преобразователь на порядок меньшей мощности компенсирует его пульсацию. Созданы математические модели основных узлов схемы. С помощью имитационного моделирования подтверждена высокая точность формирования сварочных импульсов источником питания. Показано, что пульсация мощности в нагрузке уменьшилась более чем в 5 раз при сохранении высокого КПД источника. Библ. 5, рис. 5.

Ключевые слова: контактная микросварка, импульсный источник питания, непрерывный режим управления, модульная структура.

PULSE POWER SUPPLY FOR MICRO RESISTANCE WELDING WITH THE LINK OF POWER REGULATION IN CONTINUOUS MODE

Ye.V. Verbytskyi, O.F. Bondarenko, Yu.V. Bondarenko, V.O. Didenko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: bondarenkoaf@gmail.com

In this paper, a topology of pulse power supply for micro resistance welding machine with the link of power regulation in continuous mode is suggested: the pulse converter generates the main part of the output power, when the small-power linear converter compensates the pulsations. The mathematical models of the circuit principal units are created. The high accuracy of welding pulses generation of power supply is confirmed through simulation. It is shown that the power pulsation in load is more than five times reduced, while the high efficiency of the power supply is kept. References 5, figures 5.

Key words: micro resistance welding, pulse power supply, continuous control mode, modular structure.

1. Ataush V.E., Leonov V.P., Moskvina E.G. Micro Resistance Welding in Instrument Making. Riga: RTU, 1996. 332 p. (Rus)
2. Bondarenko Yu.V., Sydorets V.M., Safronov P.S., Bondarenko O.F. The evaluation of current regulation accuracy of multi-cell-type transistor converter with combined control. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 2. Pp. 67-68. (Ukr)
3. Brown L.J., Lin J. Power Supply Designed for Small-Scale Resistance Spot Welding. *Welding Journal*. 2005. Vol. 84. No 7. Pp. 32-36. URL: <https://app.aws.org/wj/2005/07/032>.
4. Salem M. Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW). Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 130. University of Western Ontario, 2011. URL: <http://ir.lib.uwo.ca/etd/130>.
5. Wang S.C., Wei P.S. Modeling Dynamic Electrical Resistance During Resistance Spot Welding. *Journal of Heat Transfer*. 2001. No 3 (123). Pp. 576-585.

Надійшла 05.03.2018
Остаточний варіант 03.05.2018