

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ІМПУЛЬСНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ

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

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

У роботі розглянуто імпульсне джерело живлення установки контактної мікрозварювання, що працює в режимі *Interleaved*. Як основний фактор, що впливає на стійкість джерела живлення, вказано різку зміну опору зварювального контакту в процесі зварювання. З метою визначення умов для досягнення стійкої роботи джерела проведено аналіз його стійкості як замкненої системи автоматичного керування, який дав змогу виконати налаштування регулятора струму у відповідності до вимоги забезпечення високої точності відтворення необхідних законів зміни зварювального струму при зміні опору зварювального контакту в процесі зварювання. Графічно показано вплив на області стійкості зміни опору контакту. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: контактне мікрозварювання, широтно-імпульсний перетворювач, модульна структура, автоматичне керування, стійкість.

Вступ. Контактне мікрозварювання широко застосовується для отримання нероз'ємних з'єднань малогабаритних деталей у багатьох галузях виробництва, таких як електроніка, прецизійне приладобудування, машинобудування, атомна енергетика [1, 8-10]. Завдяки деяким суттєвим перевагам, а саме відсутності необхідності в припої, забезпеченню міцності з'єднань на рівні матеріалу деталей, низькому рівню термічного впливу мікрозварювання, в тому числі і контактне, успішно замінює паяння для особливо відповідальних застосувань [5].

Оскільки контактне мікрозварювання є прецизійною технологією, до характеристик джерел живлення зварювальних установок пред'являються високі вимоги. Від здатності джерела живлення забезпечувати зварювальні імпульси спеціальної форми та необхідної амплітуди з заданою точністю безпосередньо залежить якість отримуваних зварних з'єднань [2]. Тому в окремих випадках виправдано є навіть побудова вихідного формувача зварювальних імпульсів із застосуванням неефективного з точки зору ККД лінійного режиму роботи силових транзисторів, завдяки чому регулювання зварювального струму здійснюється з максимально можливою точністю, не досяжною при використанні імпульсного режиму. Компромісним варіантом є комбінування безперервного та імпульсного режимів керування силовими транзисторами формувача зварювальних імпульсів, яке дає змогу отримати задовільну енергоефективність установки та достатньо високу точність регулювання струму навантаження [3]. Проте слід за-

значити, що реалізація такого комбінування потребує доволі складних схемних рішень та алгоритмів керування [4]. Як альтернатива для побудови джерела живлення установки контактної мікрозварювання може розглядатися використання імпульсних перетворювальних модулів, що працюють у режимі *Interleaved* [7], який передбачає формування сумарного струму з кількох імпульсних струмів із певним зсувом фаз. При цьому досягається зменшення еквівалентної частоти пульсацій зварювального струму, а також постійної часу перетворювача, що підвищує точність відтворення потрібних законів зміни струму.

Необхідно зазначити, що зварювальний контакт представляє собою складне навантаження для джерела живлення, оскільки в процесі зварювання опір контакту зазвичай різко і не завжди передбачувано змінюється (рис. 1) [1, 2, 10], що призводить до зміни постійних часу об'єкта керування, погіршуючи стійкість замкненої системи і зменшуючи точність формування імпульсів зварювального струму. Ця проблема є особливо актуальною для джерел живлення з імпульсними режимами роботи. Тому **метою даної роботи** є визначення умов забезпечення стійкої роботи імпульсного джерела живлення установки контакт-

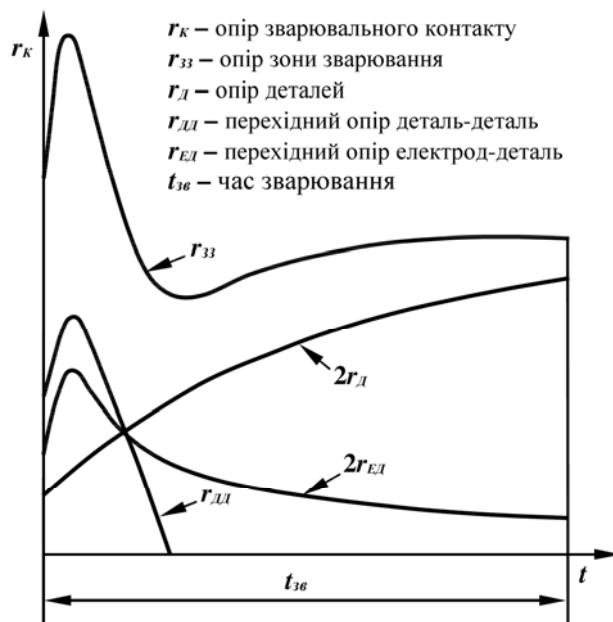


Рис. 1

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

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0003-2091-2069>; ** <https://orcid.org/0000-0002-4276-1145>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-1803-0684>; **** <https://orcid.org/0000-0001-7275-5152>

ного мікрозварювання як замкненої системи автоматичного керування при формуванні зварювального струму з необхідною точністю.

Опис досліджуваної схеми. На рис. 2 показана структура вихідного формувача зварювальних імпульсів джерела живлення установки контактної мікрозварювання. Схема складається з двох з'єднаних паралельно уніфікованих модулів (фаз) на основі понижувальних широтно-імпульсних перетворювачів (ШП), які працюють із зсувом фази 180° , реалізуючи режим Interleaved. Кожен модуль містить силову частину та систему керування. Силова частина побудована на MOSFET транзисторах VT1 і VT2 та згладжувальному дроселі L1 із давачем струму. До системи керування входять такі складові: 1 – пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор зварювального струму, 2 – обмежувач рівня напруги на вході компаратора з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), 3 – генератор тактових імпульсів, 4 – генератор опорної напруги для компаратора, 5 – компаратор, 6 – логічні елементи керування та драйвери транзисторів VT1 і VT2.

Схема вихідного формувача зварювальних імпульсів живиться від суперконденсаторного або гібридного накопичувача енергії (HE). Навантаженням силової частини формувача виступає зварювальний контакт К. Закон зміни зварювального струму фази задається сигналом напруги $u_{зад}$ ЦАП керуючого мікроконтролера (на рис. 2 не показаний), пропорційної струму $i_{зв}$, через коефіцієнт $K_{ЗЗ}$.

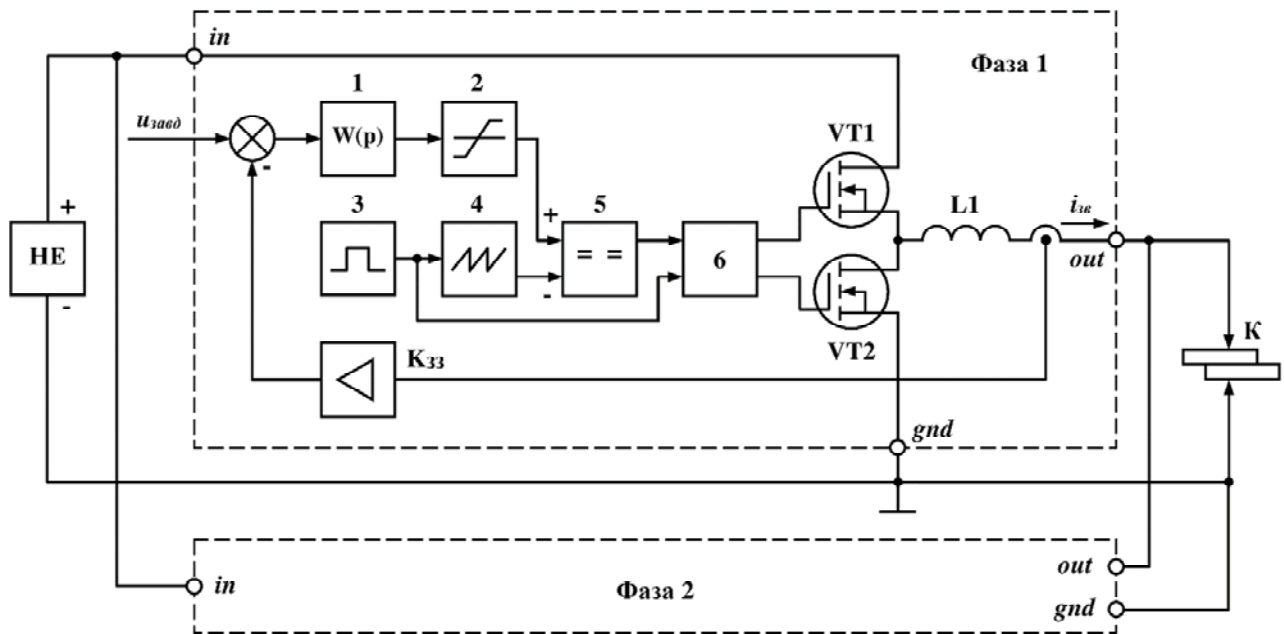


Рис. 2

Визначення параметрів регулятора. Для визначення параметрів регулятора 1 у системі на рис. 2 представимо замкнену систему перетворювач-навантаження у вигляді блок-схеми (рис. 3).

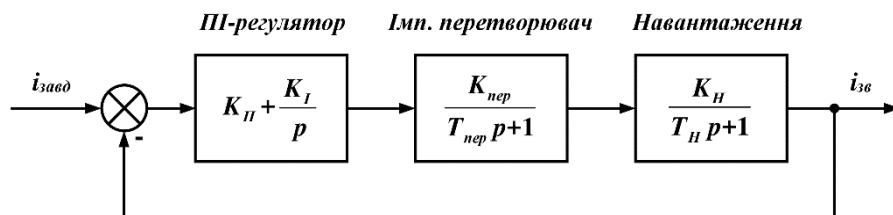


Рис. 3

На рис. 3 числові коефіцієнти, які визначають параметри блоків, позначені наступним чином: $K_П$, K_I – коефіцієнти передачі пропорційної та інтегральної складових; $K_{пер} = U_{вих} / U_{зад}$ – статичний коефіцієнт передачі перетворювача; $T_{пер} = 0,5 / f_{ШИМ}$ – постійна часу перетворювача; $T_Н = L_1 / R_Н$ – постійна часу навантаження; $K_Н = K_{ЗЗ} / R_Н$ – статичний коефіцієнт передачі навантаження, де $K_{ЗЗ}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку.

Наявність множника 0,5 у формулі визначення постійної часу перетворювача $T_{пер}$ вказує на фактичне подвоєння частоти його роботи через двофазну структуру і застосування режиму Interleaved.

Попереднє налаштування регулятора замкненої системи виконаємо на основі модульного оптимуму [6], який дає змогу отримати наперед відомі показники якості регулювання. При цьому отримані параметри налаштування регулятора можуть використовуватись як опорні для отримання інших бажаних показників якості регулювання. Таким чином, коефіцієнти передачі регулятора визначимо як

$$K_{II} = \frac{T_H}{2T_{nep}K_{nep}K_H} \quad K_I = \frac{1}{2T_{nep}K_{nep}K_H} \quad (1, 2)$$

Розрахунок стійкості системи. Характеристичний поліном замкненої системи на рис. 2 має вигляд

$$1 + \left(K_{II} + \frac{K_I}{p} \right) \frac{K_{nep}K_H}{(T_{nep}p+1)(T_Hp+1)} = 0 \quad (3)$$

$$p^3T_{nep}T_H + p^2T_H + p^2T_{nep} + p + pK_{II}K_{nep}K_H + K_IK_{nep}K_H = 0 \quad (4)$$

Після підстановки $p = j\omega$ у (4) і виконання перетворень за умови рівності комплексного числа нулю отримуємо систему рівнянь відносно параметрів налаштування ПІ-регулятора

$$\begin{cases} 0 \cdot K_{II} + K_{nep}K_HK_I - (T_H + T_{nep})\omega^2 = 0 \\ K_{nep}K_HK_{II}\omega + 0 \cdot K_I + \omega - T_{nep}T_H\omega^3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Визначник системи (5)

$$\Delta = -(K_{nep}K_H)^2 \omega \quad (6)$$

Визначник (6) при $\omega = 0 \dots \infty$ є меншим за нуль, тому штрихування області стійкості виконаємо під залежністю $K_I = f(K_{II})$. Система (5) має дві особливі прямі: $\omega = 0, K_I = 0$; $\omega = \infty, K_I = \infty, K_{II} = \infty$.

Розв'язок системи (5) за методом визначників має вигляд

$$K_{II} = \frac{\omega^2 T_{nep} T_H - 1}{K_{nep} K_H}, \quad K_I = \frac{(T_H + T_{nep}) \omega^2}{K_{nep} K_H} \quad (7, 8)$$

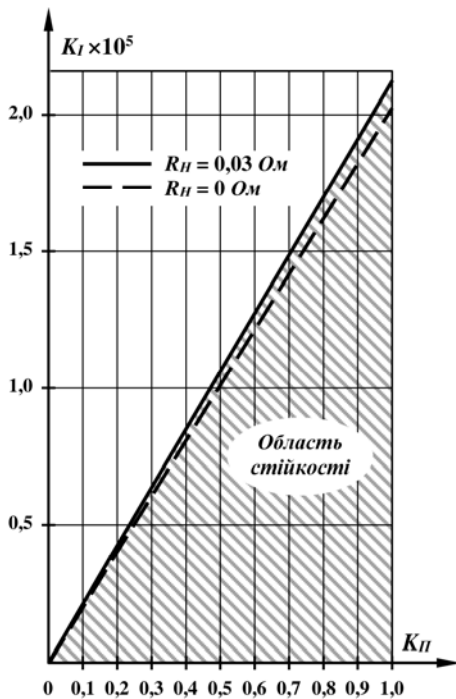


Рис. 4

струму – відхилення не більше 3-5% – при зміні опору зварювального контакту в процесі зварювання.

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 А.Ф. Формирователи импульсов тока для установок контактной микросварки, дис. канд. техн. наук: 05.09.12. Алчевск, 2007. 211 с.
3. Бондаренко О.Ф., Хижняк Т.А., Кузін Д.В. Втрати енергії в багатокоміркових транзисторних перетворювачах для контактної зварювання. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 21–25.

4. Бондаренко Ю.В. Багатокомірковий транзисторний перетворювач зі спільним використанням безперервного та імпульсного керування для контактної мікросварювання, дис. канд. техн. наук: 05.09.12. Алчевськ, 2012. 148 с.
5. Ланин В.Л., Рубцевич И.И., Керенцев А.Ф. Повышение надежности микроконтактных соединений радиационно-стойких мощных транзисторов. *Силовая электроника*. 2010. № 3. С. 100-105.
6. Лукас В.А. Теория автоматического управления. М.: Недра, 1990. 416 с.
7. Brooks S.W., Maggloino L.J. Method and apparatus for an efficient multiphase switching regulator. Patent US 6285571, 2001.
8. Gnyusov S.F., Kiselev A.S., Slobodyan M.S., Sovetchenko B.F., Nekhoda M.M., Srakov A.V., Yurin P.M. Formation of a joint in resistance spot microwelding. *Welding International*. 2005. Vol. 19. No 9. Pp. 737-741. <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2005.3510>.
9. Slobodyan M.S. Methods of Creation of Permanent Zirconium Alloy Joints in Reactor Art: A Review. *Tsvetnye Metally*. 2016. No 10. Pp. 91-98. <http://dx.doi.org/10.17580/tsm.2016.10.13>.
10. Zhou Y. Norman. Microjoining and nanojoining. Elsevier, 2008. 832 p.

УДК 621.314: 621.791

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ
В.А. Диденко, А.Ф. Бондаренко, Ю.В. Бондаренко, Е.В. Вербицкий
 Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,
 пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: bondarenkoaf@gmail.com

В работе рассмотрен импульсный источник питания установки контактной микросварки, работающий в режиме Interleaved. В качестве основного фактора, влияющего на устойчивость источника питания, указано резкое изменение сопротивления сварочного контакта в процессе сварки. С целью определения условий для достижения устойчивой работы источника проведен анализ его устойчивости как замкнутой системы автоматического управления, который позволил выполнить настройку регулятора тока в соответствии с требованием обеспечения высокой точности воспроизведения необходимых законов изменения сварочного тока при изменении сопротивления сварочного контакта в процессе сварки. Графически показано влияние на области устойчивости изменения сопротивления контакта. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: контактная микросварка, широтно-импульсный преобразователь, модульная структура, автоматическое управление, устойчивость.

ANALYSIS OF THE STABILITY OF A PULSE POWER SUPPLY FOR MICRO RESISTANCE WELDING

V.O. Didenko, O.F. Bondarenko, Yu.V. Bondarenko, Ye.V. Verbytskyi
 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 pulse power supply for micro resistance welding machine, operating in the Interleaved mode is considered. Sharp changes of the welding contact resistance during the welding process are identified as the main factor influencing the stability of the power supply. In order to determine the conditions for achieving the stable operation of the power supply, the analysis of its stability as of a closed automatic control system was carried out. That made it possible to adjust the current regulator in accordance with the requirement of ensuring high reproducibility of the necessary laws for welding current when the welding contact resistance changes during the welding. The influence of the contact resistance on the area of stability is graphically shown. References 10, figures 4.

Key words: micro resistance welding, pulse-width converter, modular structure, automatic control, stability.

1. Ataush V.E., Leonov V.P., Moskvina E.G. Micro Resistance Welding in Instrument Making. Riga: RTU, 1996. (Rus)
2. Bondarenko A.F. Current pulses generators for micro resistance welding machines. PhD thesis. Alchevsk, 2007. 211 p. (Rus)
3. Bondarenko O.F., Khyzhniak T.A., Kuzin D.V. Energy Losses in Multicell-Type Transistor Converter for Resistance Welding. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 5. Pp. 21-25. (Ukr)
4. Bondarenko Yu.V. Multicell-type Transistor Converter with Combined Continuous and Pulse Control for Micro Resistance Welding. PhD thesis. Alchevsk, 2012. 148 p. (Ukr)
5. Lanin V.L., Rubtsevich I.I., Kerentsev A.F. Increase of reliability of micro-contact joints of radiation stable power transistors. *Silovaia Elektronika*. 2010. No 3. Pp. 100-105. (Rus)
6. Lukas V.A. Theory of automatic control. Moskva: Nedra, 1990. 416 p. (Rus)
7. Brooks S.W., Maggloino L.J. Method and apparatus for an efficient multiphase switching regulator. Patent US 6285571, 2001.
8. Gnyusov S.F., Kiselev A.S., Slobodyan M.S., Sovetchenko B.F., Nekhoda M.M., Srakov A.V., Yurin P.M. Formation of a joint in resistance spot microwelding. *Welding International*. 2005. Vol. 19. No 9. Pp. 737-741. DOI: <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2005.3510>
9. Slobodyan M.S. Methods of Creation of Permanent Zirconium Alloy Joints in Reactor Art: A Review. *Tsvetnye Metally*. 2016. No 10. Pp. 91-98. DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/tsm.2016.10.13>.
10. Zhou Y. Norman. Microjoining and nanojoining. Elsevier, 2008. 832 p.

Надійшла 05.03.2018
 Остаточний варіант 04.05.2018