

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314: 621.311.6

Бондаренко Олександр Федорович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри електронних систем, Донбаський державний технічний університет, м. Алчевськ, Україна. *пр. Леніна, 16, м. 94204. тел. +380-6442-25955. E-mail: bondarenkoaf@gmail.com (orcid.org/0000-0002-4276-1145)*

Бондаренко Юлія Валеріївна, канд. техн. наук, доц. кафедри електронних систем.
E-mail: bondarenko.julie@gmail.com (orcid.org/0000-0002-1803-0684)

Сафронов Павло Сергійович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри електронних систем. *E-mail: p.s.safronov@gmail.com (orcid.org/0000-0002-5708-4933)*

Сидорець Володимир Миколайович, докт. техн. наук, проф., провід. наук. співроб./ відділу фізики газового розряду та техніки плазми, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна. *вул. Боженка, 11, 03680. тел. +380-44-2052349. E-mail: sydorvn@gmail.com (orcid.org/0000-0002-1343-775X)*

**ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ**

В роботі отримано математичні моделі вузлів джерела живлення для контактної мікрозварювання, синтезовано ланки, що корегують, а також проведено моделювання цього джерела живлення як замкненої системи регулювання при формуванні зварювального імпульсу спеціальної форми.

Ключові слова: джерело живлення, транзисторний перетворювач, математична модель, система автоматичного регулювання, закон зміни вихідної потужності.

Бондаренко Александр Федорович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электронных систем, Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина, *пр. Ленина, 16, 94204. тел. +380-6442-25955. E-mail: bondarenkoaf@gmail.com (orcid.org/0000-0002-4276-1145)*

Бондаренко Юлия Валерьевна, канд. техн. наук, доц. кафедры электронных систем. *E-mail: bondarenko.julie@gmail.com (orcid.org/0000-0002-1803-0684)*

Сафронов Павел Сергеевич, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электронных систем. *E-mail: p.s.safronov@gmail.com (orcid.org/0000-0002-5708-4933)*

Сидорец Владимир Николаевич, докт. техн. наук, проф., вед. науч. сотр. отдела физики газового разряда и техники плазмы, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина. *ул. Боженко, 11, 03680. тел. +380-44-2052349. E-mail: sydorvn@gmail.com (orcid.org/0000-0002-1343-775X)*

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ**

В работе получены математические модели узлов источника питания для контактной микросварки, синтезированы корректирующие звенья, а также проведено моделирование этого источника питания как замкнутой системы регулирования при формировании сварочного импульса специальной формы.

Ключевые слова: источник питания, транзисторный преобразователь, математическая модель, система автоматического регулирования, закон изменения выходной мощности.

Oleksandr Fedorovych Bondarenko, Ph. D., Assoc. Prof., Docent of Electronic Systems Department, Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine. *Lenin ave., 16, 94204. tel. +380-6442-25955. E-mail: bondarenkoaf@gmail.com (orcid.org/0000-0002-4276-1145)*

Iuliia Valeriivna Bondarenko, Ph. D., Docent of Electronic Systems Department. *E-mail: bondarenko.julie@gmail.com (orcid.org/0000-0002-1803-0684)*

Pavlo Sergiiovych Safronov, Ph. D., Assoc. Prof., Docent of Electronic Systems Department. *E-mail: p.s.safronov@gmail.com (orcid.org/0000-0002-5708-4933)*

Volodimir Mykolaiovych Sydorets, Dr. Eng. Sc., Prof., Leading Researcher of Department of gas discharge physics and plasma technology, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine. *Bozhenko str., 11, 03680. tel. +380-44-2052349. E-mail: sydorvn@gmail.com (orcid.org/0000-0002-1343-775X)*

**THE STUDY OF CONTROL SYSTEM
OF POWER SUPPLY FOR MICRO RESISTANCE WELDING**

The mathematical models of power supply units for micro resistance welding were obtained in this work. The simulation of the power supply as a closed loop control system was carried out for special form welding pulse generation.

Keywords: power supply, transistor converter, mathematical model, closed loop control system, output power schedule.

Вступ

Контактне мікрозварювання – ефективна технологія, що дозволяє отримувати надійні

та якісні з'єднання мініатюрних деталей, завдяки чому широко застосовується в прецизійному приладобудуванні, при виготовленні електронних компонентів і схем та ін. Зварювання реалізується шляхом пропускання електричного струму значної амплітуди через з'єднувані деталі. Умовою забезпечення високої якості зварних з'єднань є контрольоване введення енергії в зону зварювання, що дозволяє уникнути таких дефектів, як виплески металу, прожоги та непровари. Тому дуже важливою є роль джерела живлення зварювальної установки, в якому може бути передбачений контроль та регулювання зварювального струму, напруги на зварюваному контакті, потужності навантаження або кількох з цих параметрів одночасно.

Постановка задачі та мета роботи

Особливостями контактного мікрозварювання є дуже мала тривалість імпульсів зварювального струму (одиниці мілісекунд) та складний характер навантаження. Опір зони зварювання залежить від багатьох чинників, зокрема якості обробки поверхонь зварюваних деталей, матеріалу і товщини деталей, та змінюється в процесі зварювання за складним і недетермінованим законом, що може призвести до непередбачуваної зміни струму через контакт або напруги на ньому. Для забезпечення необхідної форми зварювальних імпульсів необхідно з високою точністю здійснювати регулювання таких параметрів струму (напруги, потужності), як закон наростання та спадання, амплітуда, тривалість імпульсу.

Відомі роботи, присвячені розробці ефективних топологій джерел живлення для контактного мікрозварювання зі спеціальними законами формування зварювальних імпульсів [1–5]. Також актуальним є питання розробки принципів побудови систем автоматичного регулювання джерел живлення, здатних підтримувати задані параметри зварювальних імпульсів з максимальною точністю.

Мета даної роботи – запропонувати підхід до побудови ефективної системи автоматичного регулювання джерела живлення для контактного мікрозварювання та дослідити її основні характеристики.

Загальні принципи побудови джерел живлення для контактного мікрозварювання з точки зору автоматичного регулювання

На рис. 1 спрощено представлено структуру джерела живлення для контактного мікрозварювання як системи автоматичного регулювання. Існують технічні рішення [1-5], які передбачають регулювання протягом зварювання у відповідності з заданим законом струму в зварювальному контурі, напруги на зварюваному контакті, потужності навантаження як добутку струму та напруги або спільне регулювання кількох параметрів одночасно, наприклад, потужності та струму, потужності та напруги.

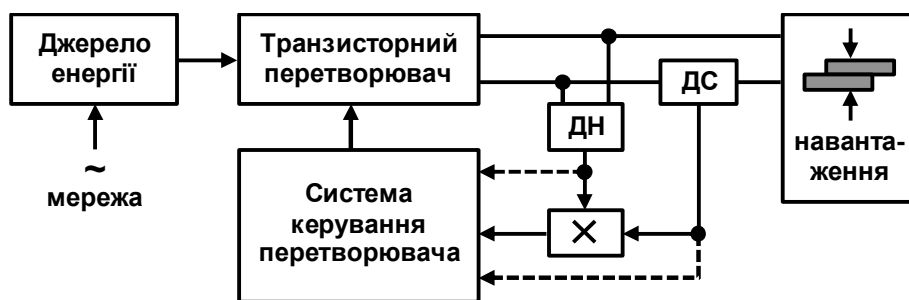


Рис 1 – Спрощена структура джерела живлення для контактного мікрозварювання

Згідно з дослідженнями [1–3], найкращої якості зварних з'єднань можна досягти, регулюючи відповідним чином вихідну потужність та контролюючи напругу на зварюваному контакті. При цьому процес зміни потужності повинен включати три основні фази (рис. 2): початкове плавне наростання за ступеневим законом, що визначається конкретними умовами зварювання (матеріалами та товщиною зварюваних деталей);

стабілізацію на максимальному рівні протягом певного часу; плавний спад. Протягом початкової фази плавного наростання потужності здійснюється поступове введення теплової енергії в зону зварювання, протягом фази стабілізації відбувається формування зварювального ядра, завершальна фаза плавного спаду сприяє рівномірній кристалізації металу в зварюваному контакті. Момент переходу від фази початкового наростання до фази стабілізації потужності відповідає досягненню певного рівня напруги на зварюваному контакті.

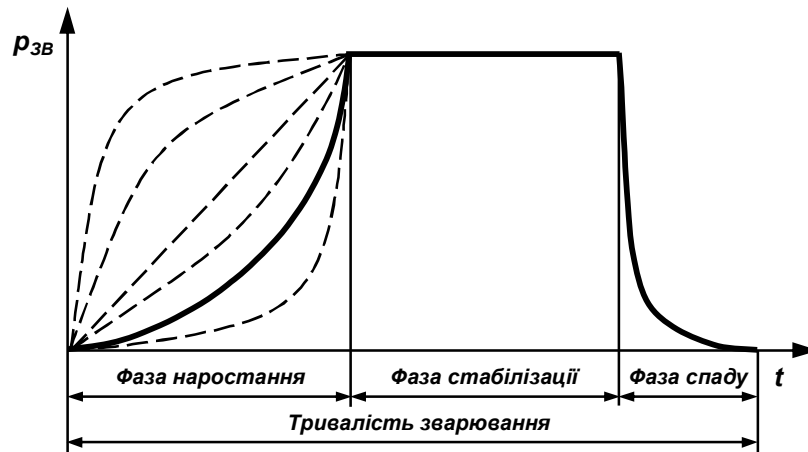


Рис. 2. Зміна потужності навантаження в процесі зварювання

Для забезпечення високої якості зварних з'єднань описаний закон зміни потужності необхідно підтримувати під час процесу зварювання з максимально можливою точністю. Тому джерело живлення як система автоматичного регулювання має миттєво реагувати на будь-які флуктуації опору навантаження, які можуть призвести до відхилення від заданого закону зміни потужності. Оскільки загальна інерційність системи визначається інерційністю всіх її складових, має бути забезпечена максимальна швидкодія кожного з вузлів.

Приклад реалізації зварювального джерела живлення як системи автоматичного регулювання

На рис. 3 показано приклад реалізації джерела живлення для контактного мікрозварювання з системою керування. В системі передбачено зворотній зв'язок за вихідною потужністю.

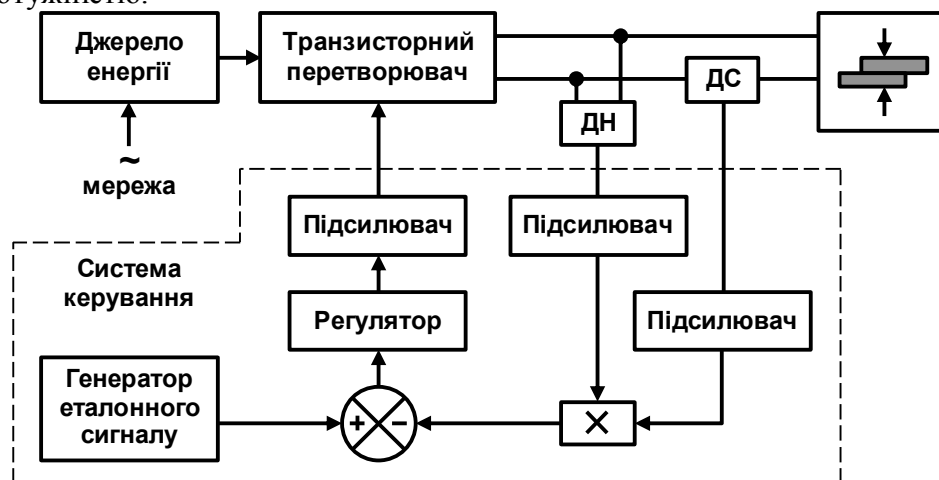


Рис. 3. Структура джерела живлення з системою керування

Сигнали з датчиків струму та напруги надходять на нормуючі підсилювачі, а потім перемножуються. На виході перемножувача, таким чином, маємо сигнал, пропорційний фактичній вихідній потужності. За допомогою блоку порівняння (блок, що віднімає)

отриманий сигнал порівнюється в реальному часі з еталонним сигналом, що визначає закон зміни потужності (рис. 2). Далі регулятор корегує сигнал різниці між еталонним та фактичним сигналами, а нормуючий підсилювач доводить його до потрібного рівня для керування силовими транзисторами перетворювача.

Для реалізації нормуючих підсилювачів та блоку порівняння доцільно використовувати схеми на операційних підсилювачах. Математичні моделі цих вузлів зазвичай представляють у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з підсиленням та з урахуванням обмежень, що накладаються величиною напруги живлення операційного підсилювача.

З точки зору підвищення швидкодії системи автоматичного регулювання реалізація перемноження сигналів з давачів струму та напруги за допомогою спеціалізованої аналогової мікросхеми (наприклад, AD530) є більш доцільною, ніж програмне перемноження цих сигналів в мікроконтролері. На основі технічних характеристик мікросхеми AD530, які надаються виробником, можна зробити висновок, що перемножувач є нелінійним елементом, кожен з каналів якого може бути представлений аперіодичною ланкою першого порядку.

На рис. 4 показано структуру джерела живлення як системи автоматичного регулювання. На рисунку введено наступні позначення: $a_{ET}(p)$ – еталонний сигнал, що визначає закон зміни потужності; $a_{33}(p)$ – сигнал зворотного зв'язку, пропорційний фактичній вихідній потужності; $U_{KEP}(p)$ – сигнал керування транзисторним перетворювачем; $I_{3B}(p)$ – струм в зварювальному контурі; $U_E(p)$ – напруга на зварювальних електродах; $U_{ДС}(p)$ – сигнал з давача струму; $U_{ДН}(p)$ – сигнал з давача напруги; $U_X(p)$ – сигнал в першому каналі перемножувача; $U_Y(p)$ – сигнал в другому каналі перемножувача; $W_{БП}(p)$ – передавальна функція блоку порівняння; $W_P(p)$ – передавальна функція регулятора; $W_{НП}(p)$ – передавальна функція нормуючого підсилювача; $W_{ТП}(p)$ – передавальна функція транзисторного перетворювача; $W_{ДС}(p)$ – передавальна функція давача струму з нормуючим підсилювачем; $W_{ДН}(p)$ – передавальна функція давача напруги з нормуючим підсилювачем; S – крутизна прохідної ВАХ транзисторів перетворювача; n – кількість паралельно з'єднаних транзисторів перетворювача; T_1 – постійна часу, що визначається інерційністю зварювального контуру; T_2 – постійна часу, що визначається інерційністю транзисторів перетворювача; R_{3B} – опір зони зварювання; $R_{Ш}$ – опір вимірювального шунта.

Для визначення типу регулятора схема на рис. 4 була лінеаризована та за допомогою метода структурних перетворень приведена до типової одноконтурної системи, при цьому було прийнято допущення, що контур зворотного зв'язку є безінерційним.

З урахуванням прийнятих допущень передавальна функція об'єкту регулювання може бути отримана у вигляді:

$$W_O(p) = \frac{0,25 \cdot n \cdot S^2 \cdot R_{3B}}{(T_1 p + 1)(0,5 T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(0,5 T_2 p + 1)}, \quad (1)$$

Оскільки постійна часу T_1 значно більша за T_2 . Передавальну функцію об'єкту регулювання можна представити у вигляді ланки третього порядку:

$$W_O(p) = \frac{k_O}{(T_{O1} p + 1)(T_{O2} p + 1)(T_{O3} p + 1)}, \quad (2)$$

$$\text{де } k_O = 0,25 \cdot n \cdot S^2 \cdot R_{3B}, \quad T_{O1} = T_1, \quad T_{O2} = 0,5 T_1, \quad T_{O3} = T_2 + 0,5 T_2.$$

Оскільки в даному випадку функцією системи автоматичного регулювання зварювального джерела живлення є забезпечення точної підтримки заданих законів зміни потужності, які є ступеневими функціями з різними показниками ступеню для різних умов зварювання, для зменшення помилок регулювання система повинна мати як мінімум астатизм другого порядку.

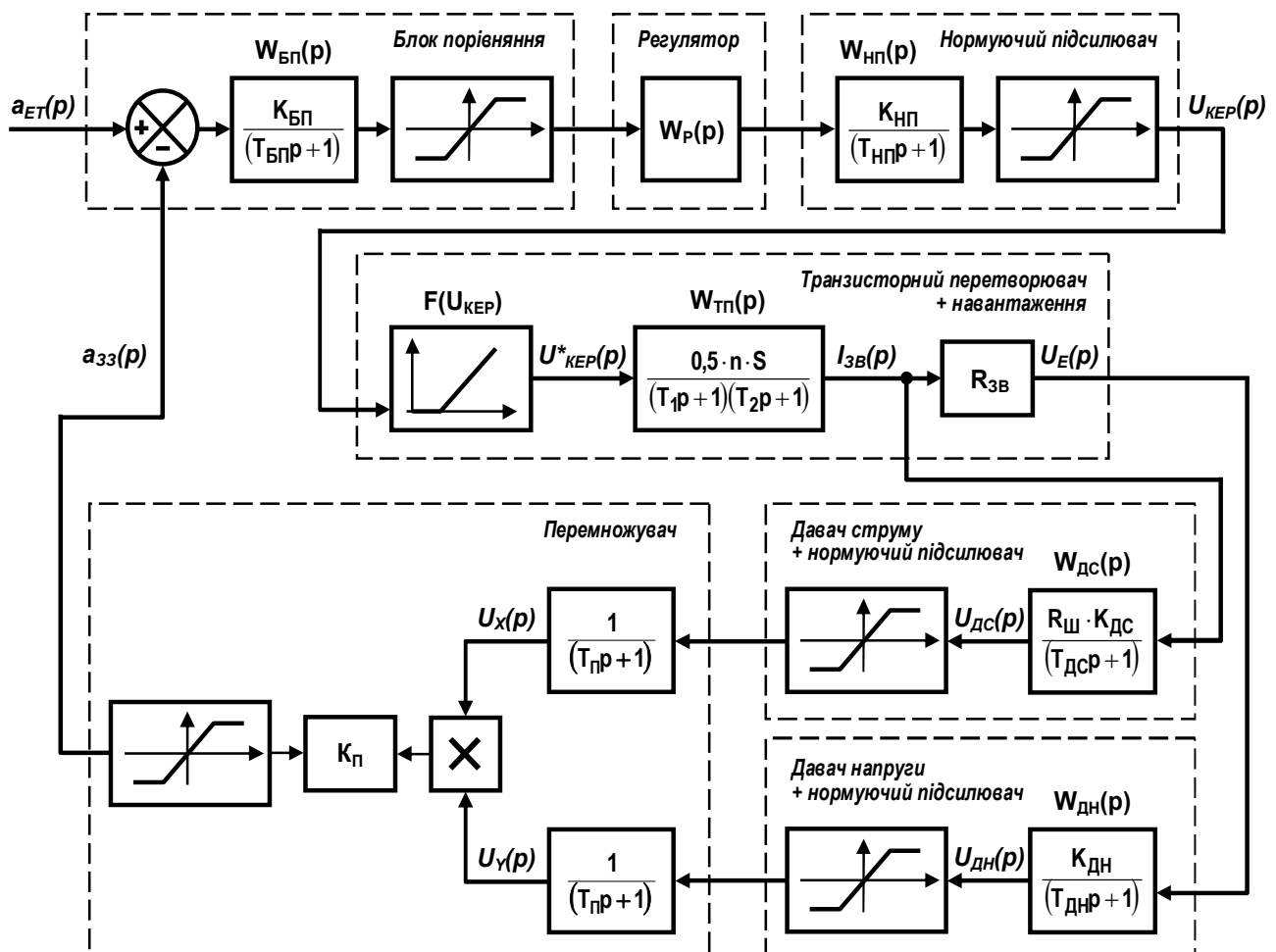


Рис. 4. Структура джерела живлення як системи автоматичного регулювання

Однак такі системи є структурно нестійкими і потребують особливих методів настроювання та вибору параметрів регулятора. В системах з астатизмом першого порядку будуть присутні помилки за швидкістю та прискоренням, які, проте, при відповідному виборі параметрів регулятора можуть бути мінімізовані.

Для конкретного прикладу реалізації джерела живлення після розрахунку постійних часу та коефіцієнту передачі об'єкту були отримані наступні значення: $T_{O1} = 33$ мкс, $T_{O2} = 17$ мкс, $T_{O3} = 3,5$ мкс, $k_0 = 126,75$. Як відомо, для об'єкту регулювання з такими параметрами необхідно використовувати ПД-регулятор, з налаштуванням на симетричний оптимум. Синтезований регулятор був застосований в схемі на рис. 4.

З використанням структури, наведеної на рис. 4, було проведено імітаційне моделювання роботи джерела живлення для контактного мікрозварювання як системи автоматичного регулювання. На рис. 5 представлено діаграми, отримані в результаті моделювання. Зверху вниз на рисунку показані: діаграма зміни опору зони зварювання; напруга на електродах; зварювальний струм; вихідна потужність. Як видно з діаграм, вихідна потужність підтримується у відповідності до заданого закону, тоді як криві струму та напруги не формуються якимось спеціальним чином, а визначаються заданим законом зміни потужності та зміною опору зони зварювання.

Точність регулювання вихідної потужності була оцінена шляхом розрахунку середньоквадратичного відхилення фактичної кривої зміни потужності від еталонного сигналу, яке склало приблизно шість ват на фоні більш ніж чотирьох кіловат середньої потужності.

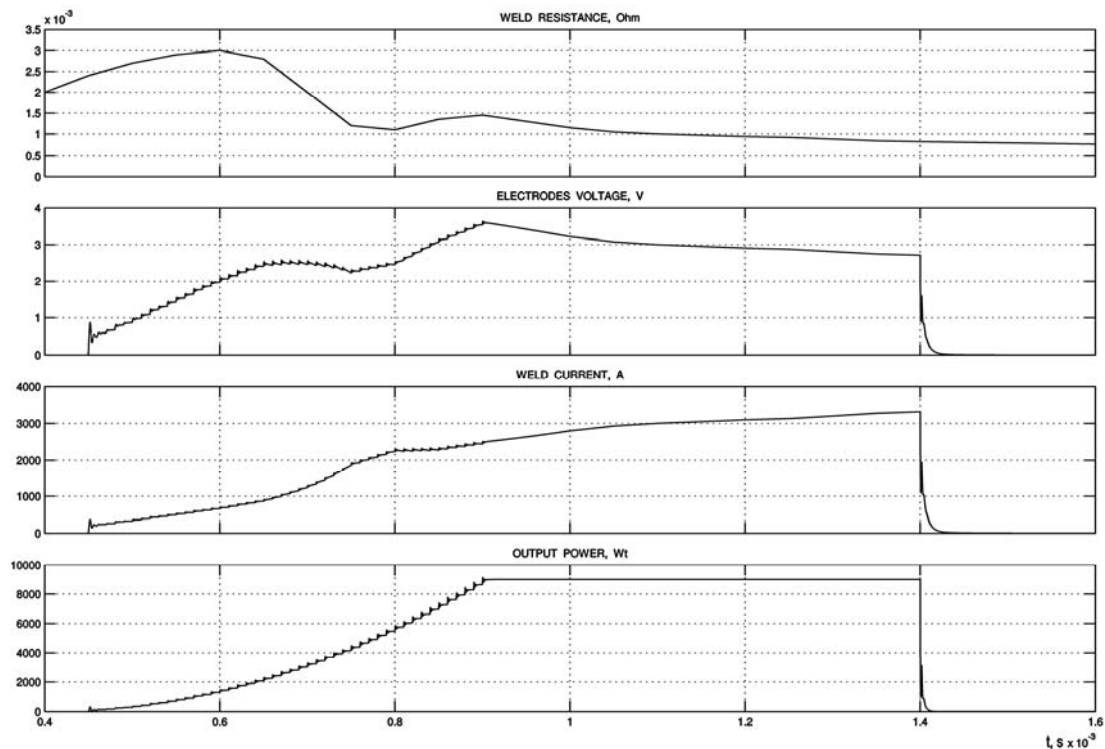


Рис. 5 – Діаграми часу, отримані в результаті моделювання

Висновки

Отримана математична модель джерела живлення для контактної мікросварки дозволила провести його дослідження як замкненої системи автоматичного регулювання. В результаті імітаційного моделювання, проведеного з використанням цієї моделі, підтверджено ефективність синтезованих кіл корекції при формуванні імпульсу потужності спеціальної форми.

Список використаної літератури

1. Бондаренко А. Ф. Формирователи импульсов тока для установок контактной микросварки: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.12 / Бондаренко Александр Федорович. – Алчевск, 2007. – 211 с.
2. Атауш В. Е., Леонов В. П. и Москвин Э. Г. Микросварка в приборостроении. Рига: РТУ, 1996, 332 с.
3. Salem, Meranda, "Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW)" (2011). University of Western Ontario - Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 130. [Online]. Available: <http://ir.lib.uwo.ca/etd/130>
4. Chen, J. (2005). Fundamental studies for development of real-time model-based feedback control with model adaptation for small scale resistance spot welding. (Electronic Thesis or Dissertation). [Online]. Available: http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1109646314
5. Nippon Avionics Co., Ltd, Welding Power Supply. [Online]. Available: <http://www.avio.co.jp/english/products/assem/lineup/welding/power/index.html>.

References

1. Bondarenko A. F. The current pulse generators for micro resistance welding machines: PhD thesis: 05.09.12 / Bondarenko Aleksandr Fedorovich. – Alchevsk, 2007. – 211 pp. (Rus.).
2. Ataush V. E., Leonov V. P. & Moskvina E. G. Micro welding in instrument making. Riga: RTU, 1996, 332 pp. (Rus.).
3. Salem, Meranda, "Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW)" (2011). University of Western Ontario - Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 130. [Online]. Available: <http://ir.lib.uwo.ca/etd/130>
4. Chen, J. (2005). Fundamental studies for development of real-time model-based feedback control with model adaptation for small scale resistance spot welding. (Electronic Thesis or Dissertation). [Online]. Available: http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1109646314
5. Nippon Avionics Co., Ltd, Welding Power Supply. [Online]. Available: <http://www.avio.co.jp/english/products/assem/lineup/welding/power/index.html>

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.