

## ПОЛІПШЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

П.С.Сафронов<sup>1</sup>, Ю.В.Бондаренко<sup>1</sup>, О.Ф.Бондаренко<sup>1</sup>, В.М.Сидорець<sup>2</sup>, Д.В.Кучеренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Донбаський державний технічний університет, пр. Леніна, 16, Алчевськ, 94204, Україна,

<sup>2</sup> – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Боженка, 11, Київ, 03680, Україна.

e-mail: [p.s.safronov@gmail.com](mailto:p.s.safronov@gmail.com)

*З метою поліпшення електромагнітної сумісності джерел живлення установок контактного зварювання з мережею запропоновано використовувати схемну топологію з проміжним накопичувачем енергії та багатофазним коректором коефіцієнту потужності. Запропонований спосіб реалізації багатофазного коректора коефіцієнту потужності передбачає роботу кожної уніфікованої фази коректора в режимі переривчастого струму, близького до граничного, і дозволяє отримати вхідний струм, наближений до синусоїдального. За допомогою імітаційного моделювання виконано оцінку коефіцієнту гармонічних спотворень досліджуваної схеми та підтверджено ефективність запропонованих рішень. Бібл. 6, рис. 4.*

**Ключові слова:** контактне зварювання, джерело живлення, ємнісний накопичувач енергії, багатофазний коректор коефіцієнта потужності, коефіцієнт гармонічних спотворень.

**Вступ.** Одним з найбільш ефективних способів з'єднання металевих деталей є контактне зварювання, яке реалізується шляхом їхнього нагрівання в точці зварювання до температури плавлення електричним струмом, що пропускається крізь них. Характерні для контактного зварювання амплітуди струму знаходяться в діапазоні від сотень ампер до одиниць кілоампер і залежать від матеріалу та товщини зварюваних деталей. Зварювання може здійснюватись як змінним, так і постійним струмом. Зварюванню постійним струмом надається перевага при з'єднанні деталей відповідального призначення. Джерела живлення постійного струму здатні здійснювати необхідне формування зварювального струму і, відповідно, забезпечувати більш високу якість з'єднань [1].

З точки зору енергоспоживання контактне зварювання має певні особливості. Енергія для зварювання споживається імпульсами, тривалість яких є дуже малою на фоні пауз між ними і може складати одиниці – десятки мілісекунд. Такий характер енергоспоживання погіршує електромагнітну сумісність зварювальних установок з мережею живлення, яка не може бути значною мірою поліпшена при побудові джерел живлення за традиційно використовуваною топологією, що передбачає пряме споживання енергії з мережі. Для зменшення впливу на мережу бажаним є використання для живлення зварювальних установок джерел, виконаних за топологією з проміжним накопиченням енергії, яка сама по собі забезпечує кращу електромагнітну сумісність з мережею, а також надає більше можливостей для її поліпшення шляхом застосування кіл корекції та фільтрації.

Одним зі способів поліпшення електромагнітної сумісності джерела живлення з мережею, поряд з пасивною та активною фільтрацією, є застосування коректора коефіцієнта потужності. Останнім часом, здебільшого в закордонних виданнях, з'являються публікації, присвячені побудові коректорів коефіцієнта потужності за багатофазним принципом (Multiphase Interleaved PFC) [2]. Такий підхід видається перспективним і цікавим з точки зору можливостей підвищення енергоефективності схеми, а також прецизійного формування вхідного струму.

Мета даної роботи – досягти поліпшення електромагнітної сумісності з мережею джерела живлення постійного струму установки контактного зварювання шляхом використання схемної топології з проміжним накопиченням енергії та застосування ефективного способу реалізації багатофазної корекції коефіцієнта потужності.

### Схемні топології джерел живлення постійного струму установок контактного зварювання.

До недавнього часу при побудові джерел живлення постійного струму зварювальних установок переважно використовувалася схемна топологія з прямим споживанням енергії з мережі (Direct Energy type) [3]. Типова структура джерел живлення такої топології показана рис. 1, а. Вона, як правило, включає вхідний випрямляч, фільтр випрямленої напруги, інвертор, трансформатор та вихідний випрямляч. Функцію регулювання зварювального струму виконує інвертор, який зазвичай керується ШІМ-сигналом. Задля розширення можливостей регулювання струму вхідний випрямляч також може бути керованим. Джерела живлення зварювальної установки, побудовані за цією топологією, характеризуються низькою електромагнітною сумісністю з мережею, оскільки кола корекції та фільтрації не можуть повністю знівелювати вплив її навантаження з урахуванням раніше зазначених особливостей енергоспоживання. Широке використання такої топології, незважаючи на її явний недолік, здебільшого пояснювалось відсутністю на ринку компонентів, які б могли бути застосовані як ефективні буферні накопичувачі енергії.

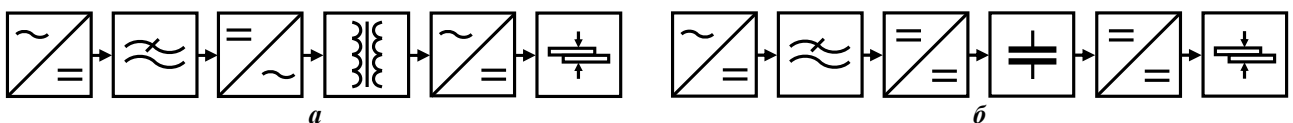


Рис. 1

Побудова джерел живлення для установок контактної зварювання за топологією з проміжним накопиченням енергії (Energy Storage type) [4] із застосуванням громіздких акумуляторних батарей та електролітичних конденсаторів призводила до суттєвого погіршення їхніх масо-габаритних показників, що обумовлювало невисоку розповсюдженість такого підходу. Поява і розвиток нового типу накопичувачів – суперконденсаторів (іоністорів), які за своїми енергетичними характеристиками є проміжною ланкою між батареями та електролітичними конденсаторами і при цьому мають мініатюрні розміри, здатні значним чином вплинути на підвищення популярності топології типу Energy Storage для побудови джерел живлення зварювальних установок [5]. Структура джерела живлення з проміжним накопиченням енергії наведена на рис. 1, б. Дана структура містить випрямляч, фільтр, понижуючий перетворювач, накопичувач енергії та вихідний регулятор зварювального струму.

**Схемна реалізація джерела типу Energy Storage з багатофазною корекцією коефіцієнта потужності.**

На рис. 2, а показано варіант схемної реалізації структури, наведеної на рис. 1, б, з багатофазним коректором коефіцієнта потужності та суперконденсатором  $C_{HE}$ , що дозволять здійснювати накопичення достатньої енергії для формування кожного зварювального імпульсу без підкачки енергії з мережі, забезпечать швидку передачу енергії до навантаження та високі масо-габаритні показники системи. Для заряджання  $C_{HE}$  може бути використаний зворотний перетворювач, який здійснюватиме також гальванічну розв'язку первинного та вторинного кіл. Як вихідний регулятор зварювального струму буде ефективним багатофазний транзисторний перетворювач із спільним використанням безперервного та імпульсного способів керування, здатний забезпечити високу точність формування струму і високу енергоефективність, функціонування якого докладно описано в [6].

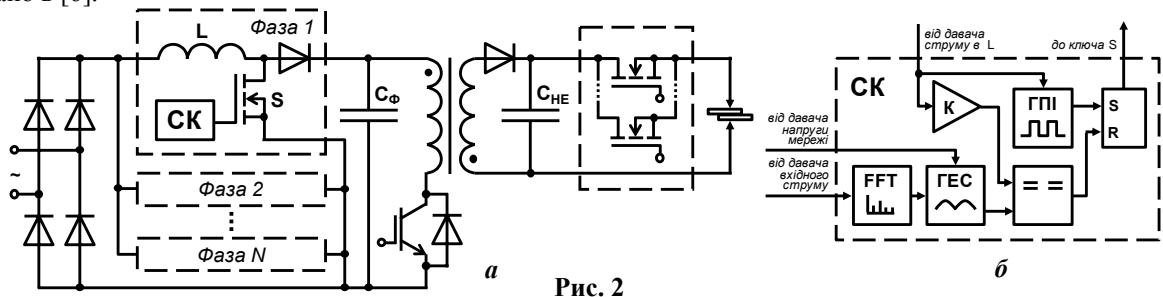


Рис. 2

Кола корекції пропонується виконати у вигляді N паралельно з'єднаних уніфікованих фаз, кожна з яких побудована, згідно з класичним підходом, як підвищуючий імпульсний перетворювач постійної напруги. Фази мають працювати у граничному режимі або в режимі переривчастого струму, близькому до граничного, і формувати струм зі зсувом одна відносно одної, що дозволить сформувати вхідний безперервний струм, близький до синусоїдального. Індуктивності фаз пропонується встановити однаковими, на відміну від [2]. Логічна структура системи керування (СК) кожної з фаз корекції спрощено показана на рис. 2, б.

Генератор прямокутних імпульсів (ГПІ) встановлює тригер і вмикає ключ S. Генератор еталонного сигналу (ГЕС) формує криву, що обмежує наростання струму в індуктивності цієї фази. Блок К формує сигнал, пропорційний струму в індуктивності. Компаратор здійснює порівняння сигналів з блоків ГЕС та К і генерує сигнал тригеру, який вмикає ключ S. Таким чином, струм кожної фази змінюється в межах від нуля до поточного значення еталонного сигналу. Вмикання ключа S здійснюється ГПІ примусово, а вимикання відбувається при досягненні струмом в індуктивності фази заданого еталонного значення. ГПІ кожної фази формують сигнали зі зсувом, рівним  $(i-1) \cdot T/N$ , де T – період прямокутного сигналу, N – кількість фаз корекції, i – номер фази. Частота прямокутних імпульсів, формованих ГПІ, попередньо обчислюється з урахуванням величини струму в індуктивності фази таким чином, щоб забезпечити режим протікання струму, близький до граничного. Сигнал ГЕС формується синхронізовано з напругою мережі та з урахуванням спектрального складу вхідного струму, що отримується за допомогою швидкого перетворення Фур'є. На рис. 3 показано струми фаз у збільшеному масштабі.

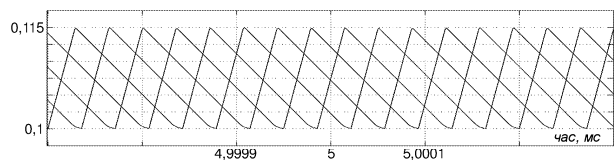


Рис. 3

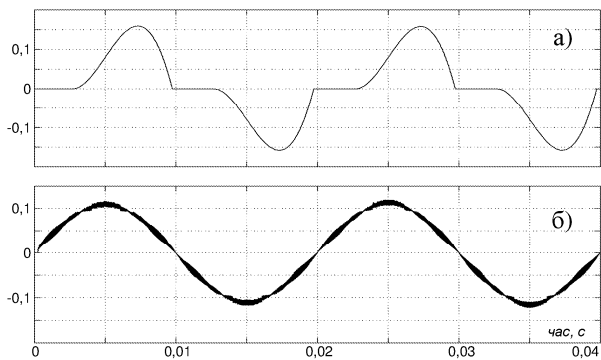


Рис. 4

На рис. 4 показано отримані в результаті імітаційного моделювання діаграми вхідного струму джерела живлення типу Energy Storage установки контактної зварювання: а) без застосування кіл корекції, б) при застосуванні чотирифазного коректора, побудованого як було описано вище. В першому випадку коефіцієнт гармонічних спотворень струму ( $THD_i$ ) склав 43 %, в другому – 4,9 %. Значення  $THD_i$ , отримане при застосуванні коректора, відповідає як вітчизняним, так і європейським стандартам якості електроенергії. Також було оцінено значення  $THD_i$  для

схеми, виконаної за топологією Direct Energy (діаграма струму не наведена), яке склало 156 %.

Зауважимо, що разом з коректором коефіцієнта потужності здебільшого використовуються фільтри електромагнітних завад (ЕМІ-фільтри) для згладжування високочастотних пульсацій вхідного струму, сформованого за допомогою коректора, та додаткового підвищення показника THD<sub>i</sub>. Як видно з отриманих результатів, при використанні описаного багатофазного коректора необхідності у застосуванні фільтру немає.

**Висновки.** Таким чином, задача поліпшення електромагнітної сумісності джерел живлення установок контактної зварювання може бути вирішена, по-перше, шляхом використання схемної топології з проміжним накопиченням енергії, яка дозволяє зменшити вплив нестационарного навантаження на мережу, а, по-друге, шляхом застосування багатофазного коректора коефіцієнта потужності, який дозволяє отримати вхідний синусоїдальний струм високої якості навіть без застосування кіл фільтрації. За допомогою імітаційного моделювання підтверджено ефективність запропонованих заходів. Майбутні дослідження плануються присвятити питанням оцінки енергоефективності джерела живлення з багатофазним коректором коефіцієнта потужності.

1. Li W., Cerjanec D., Grzadzinski G.A. A Comparative Study of Single-Phase AC and Multiphase DC Resistance Spot Welding // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2005. – № 127(3). – Pp. 583–589.

2. Schafmeister F., Wang X., Grote T., Ide P. Scalable Multi Phase Interleaved Boundary Mode PFC Concept enabling Energy- and Cost Efficient PSUs in the kW-Range // Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2010. – Pp. 3831–3835.

3. Wagner M., Kolb S. Efficiency Improvements for High Frequency Resistance Spot Welding // Proceedings of IEEE European Conference on Power Electronics and Applications. – 2013. – Pp. 1–9.

4. US 20010047982. Resistance welding power supply apparatus / *Mikio Watanabe*; Miyachi Technos KK. 06.12.2001.

5. Gould J.E., Chang H. Estimations of compatibility of supercapacitors for use as power sources for resistance welding guns // Welding in the World. – 2013. – Vol. 57. – № 6. – Pp. 887–894.

6. Бондаренко Ю.В., Сидорець В.М., Сафронов П.С., Бондаренко О.Ф. Оцінка точності регулювання струму багатоколірного транзисторного перетворювача з комбінованим керуванням // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 67–68.

УДК 621.314: 621.311.6

#### УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

П.С.Сафронов<sup>1</sup>, Ю.В.Бондаренко<sup>1</sup>, А.Ф.Бондаренко<sup>1</sup>, В.Н.Сидорець<sup>2</sup>, Д.В.Кучеренко

<sup>1</sup> – Донбасский государственный технический университет, пр. Ленина, 16, Алчевск, 94204, Украина,

<sup>2</sup> – Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, Киев, 03680, Украина.

e-mail: p.s.safronov@gmail.com

С целью улучшения электромагнитной совместимости источников питания установок контактной сварки с сетью предложено использовать схемную топологию с промежуточным накопителем энергии и многофазным корректором коэффициента мощности. Предложенный способ реализации многофазного корректора коэффициента мощности предусматривает работу каждой унифицированной фазы корректора в режиме прерывистого тока, близкого к граничному, и позволяет получить входной ток, приближенный к синусоидальному. С помощью имитационного моделирования выполнена оценка коэффициента гармонических искажений исследуемой схемы и подтверждена эффективность предложенных решений. Библ. 6, рис. 4.

**Ключевые слова:** контактная сварка, источник питания, емкостной накопитель энергии, многофазный корректор коэффициента мощности, коэффициент гармонических искажений.

#### INCREASE OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF POWER SUPPLIES FOR RESISTANCE WELDING

P.S.Safronov<sup>1</sup>, Yu.V.Bondarenko<sup>1</sup>, O.F.Bondarenko<sup>1</sup>, V.M.Sydorets<sup>2</sup>, D.V.Kucherenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Donbas State Technical University, Lenin ave., 16, Alchevsk, 94204, Ukraine,

<sup>2</sup> – Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Bozhenko str., 11, Kyiv, 03680, Ukraine.

e-mail: p.s.safronov@gmail.com

Energy Storage circuit topology with multiphase interleaved power factor corrector is proposed to use for increasing electromagnetic compatibility of power supplies for resistance welding with power line. The offered power factor corrector realization way means operation of each unified phase in discontinuous current mode that is near to boundary mode. It makes possible to provide approximately sinusoidal input current. The estimation of total harmonic distortion is carried out and the efficiency of proposed decisions is confirmed by simulation. References 6, figures 4.

**Key words:** resistance welding, power source, capacitive energy storage, multiphase power factor corrector, total harmonic distortion.

1. Li W., Cerjanec D., Grzadzinski G.A. A Comparative Study of Single-Phase AC and Multiphase DC Resistance Spot Welding // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2005. – № 127(3). – Pp. 583–589.

2. Schafmeister F., Wang X., Grote T., Ide P. Scalable Multi Phase Interleaved Boundary Mode PFC Concept enabling Energy- and Cost Efficient PSUs in the kW-Range // Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2010. – Pp. 3831–3835.

3. Wagner M., Kolb S. Efficiency Improvements for High Frequency Resistance Spot Welding // Proceedings of IEEE European Conference on Power Electronics and Applications. – 2013. – Pp. 1–9.

4. US 20010047982. Resistance welding power supply apparatus / *Mikio Watanabe*; Miyachi Technos KK. 06.12.2001.

5. Gould J.E., Chang H. Estimations of compatibility of supercapacitors for use as power sources for resistance welding guns // Welding in the World. – 2013. – Vol. 57. – № 6. – Pp. 887–894.

6. Bondarenko Yu.V., Sydorets V.M., Safronov P.S., Bondarenko O.F. The evaluation of current regulation accuracy of multicell-type transistor converter with combined control // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 2. – Pp. 67–68. (Ukr)

Надійшла 17.02.2014