

УДК 621.791.03, 621.314.2, 621.316.727

© Поднебенная С.К.<sup>1</sup>, Бурлака В.В.<sup>2</sup>,  
Гулаков С.В.<sup>3</sup>, Скосырев В.Г.<sup>4</sup>**ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ МАШИНЫ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ С  
УЛУЧШЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТЬЮ**

Целью работы является разработка источника питания машины контактной сварки с повышенными технико-экономическими показателями. На основе анализа существующих схемных решений трехфазных источников питания машин контактной сварки предложено новое схемное решение источника питания, основанное на применении непосредственного матричного преобразователя. В качестве силовых ключей в разработанном источнике питания используются транзисторно-диодные коммутаторы, каждый из которых состоит из транзистора и четырех диодов. Такое решение позволяет снизить себестоимость источника, уменьшить потери мощности в нем. Для решения задачи диссипации энергии поля рассеяния трансформатора при смене полярности выходного напряжения, возникающей из-за того, что преобразователь является нерекуперативным, авторами предложено оригинальное решение бездиссипативного квазирезонансного ограничителя напряжения. Он состоит из последовательно соединенных конденсатора и двунаправленного ключа. Его применение приводит к уменьшению потерь мощности. Разработаны алгоритмы управления ключами, позволяющие обеспечить электромагнитную совместимость источника с сетью и повысить его коэффициент мощности.

**Ключевые слова:** контактная сварка, источник питания, трехфазно-однофазный преобразователь, устройство ограничения напряжения.

**Поднебенна С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В., Скосырев В.Г. Джерело живлення машини контактної зварювання з покращеною електромагнітною сумісністю.** Метою роботи є розробка джерела живлення машини контактної зварювання із підвищеними техніко-економічними показниками. На основі аналізу існуючих схемних рішень трифазних джерел живлення машин контактної зварювання запропоновано нове схемне рішення джерела живлення, засноване на застосуванні безпосереднього матричного перетворювача. В якості силових ключів в розробленому джерелі живлення використовуються транзисторно-діодні комутатори, кожен з яких складається з транзистора і чотирьох діодів. Таке рішення дозволяє знизити собівартість джерела, зменшити втрати потужності в ньому. Для вирішення завдання дисипації енергії поля розсіювання трансформатора при зміні полярності вихідної напруги, що виникає через те, що перетворювач є нерекуперативним, авторами запропоновано оригінальне рішення бездисипативного квазирезонансного обмежувача напруги. Він складається з послідовно з'єднаних конденсатора і двоспрямованого ключа. Його застосування призводить до зменшення втрат потужності. Розроблено алгоритми управління ключами, що дозволяють забезпечити електромагнітну сумісність джерела з мережею і підвищити його коефіцієнт потужності.

**Ключові слова:** контактне зварювання, джерело живлення, трифазно-однофазний перетворювач, пристрій обмеження напруги.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, докторант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [podsvet@gmail.com](mailto:podsvet@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотр., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [VladimirV.Burlaka@gmail.com](mailto:VladimirV.Burlaka@gmail.com)

<sup>3</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [gulakov\\_s\\_v@pstu.edu](mailto:gulakov_s_v@pstu.edu)

<sup>4</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

*S.K. Podnebennaya, V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, V.G. Skosyrev. Power source for resistance welding machine with increased electromagnetic compatibility. The aim of the work is to develop a power source for a resistance welding machine with improved technical and economic properties. Based on the analysis of existing circuit topologies of three-phase power supplies of resistance welding machines, a new circuit topology of the power supply based on the use of a direct matrix converter is proposed. Transistor-diode circuits are used as power switches in the developed power supply. Each switch consists of a transistor and four diodes. This topology makes it possible to reduce the cost of the supply, and to simplify its control system. To solve the problem of the energy dissipation of the leakage field of a transformer when the polarity of the output voltage is changed, due to the fact that the converter is non-recuperative, the authors proposed an original scheme of a non-dissipative quasi-resonant voltage limiter. It consists of a series-connected capacitor and a bi-directional switch. Its application results in power losses reduction. Switch control algorithms have been developed that make it possible to ensure electromagnetic compatibility of the source with the network and to increase its power factor.*

**Keywords:** resistance welding machine, power supply, three-to-one-phase converter, voltage limiter.

**Постановка проблемы.** Наиболее распространенными источниками питания (ИП) для контактной сварки в условиях промышленного производства на сегодняшний день являются однофазные источники, в которых используются тиристорные преобразователи. Главными преимуществами таких ИП являются простота, высокая надежность. Однако, несмотря на это, им присущи и существенные недостатки. Прежде всего, к ним относится невозможность обеспечения электромагнитной совместимости с электрической сетью, в основном за счет несимметрии и несинусоидальности. В результате происходит не только ухудшение качества электроэнергии в точке общего присоединения, значительное влияние оказывается и на сварочный процесс [1, 2]. Кроме того, невысокую эффективность имеет и сам источник питания, ведь низкий коэффициент мощности обуславливает высокий уровень потребления реактивной мощности, что требует дополнительных устройств компенсации [3, 4].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [4] описан источник питания для контактной сварки, который позволяет достичь высокого коэффициента мощности, обеспечить симметричное потребление токов от электрической сети, уменьшить чувствительность к колебаниям напряжения. В основе описанного источника лежит использование матричного преобразователя напряжения без промежуточного звена постоянного тока. Последнее позволяет значительно улучшить массогабаритные и экономические показатели предлагаемого источника питания по сравнению с источниками, основанными на использовании выпрямителей и инверторов, с использованием промежуточного звена постоянного тока [5, 6]. Однако источники, описанные в [4], имеют и недостатки, основным из которых является большое количество силовых транзисторов (двенадцать или десять, если выходное напряжение преобразователя синхронизировано с сетевой частотой). Кроме высокой себестоимости, большое количество силовых транзисторов обуславливает повышенные потери мощности в самом источнике, что снижает его энергоэффективность.

**Целью работы** является разработка источника питания, обеспечивающего электромагнитную совместимость с электрической сетью, в котором использован принцип непосредственного преобразования энергии и при этом применяется уменьшенное число силовых транзисторов.

**Изложение основного материала.** На рис. 1 приведена структурная схема источника питания для контактной сварки. Он состоит из сварочного трансформатора, преобразователя, который устанавливается в первичную цепь трансформатора, и входного фильтра, включенного между преобразователем и сетью (рис. 1). В качестве входных сигналов для управления преобразователем выступают первичные ток и напряжение, измеряемые соответствующими датчиками (ДТ, ДН рис. 1), а также напряжения сети.

Авторами предложено схемное решение (рис. 2), в котором в качестве силовых ключей непосредственного преобразователя использованы диодно-транзисторные коммутаторы, каждый из которых состоит из транзистора и четырех диодов. Формирование выходного напряжения преобразователя осуществляется блоком управления (рис. 2). В нем происходит выбор па-

ры ключей (S1 – S2, S3 – S4, S5 – S6, рис. 2), которые должны переключаться в течение периода ШИМ таким образом, чтобы нагрузка в любой момент времени подключалась к двум требуемым фазам сети напрямую, без промежуточного звена постоянного тока. В блоке управления осуществляется и расчет скважностей этих ключей. Алгоритмы выбора требуемой пары ключей и расчета скважностей аналогичны описанным в литературном источнике [4].

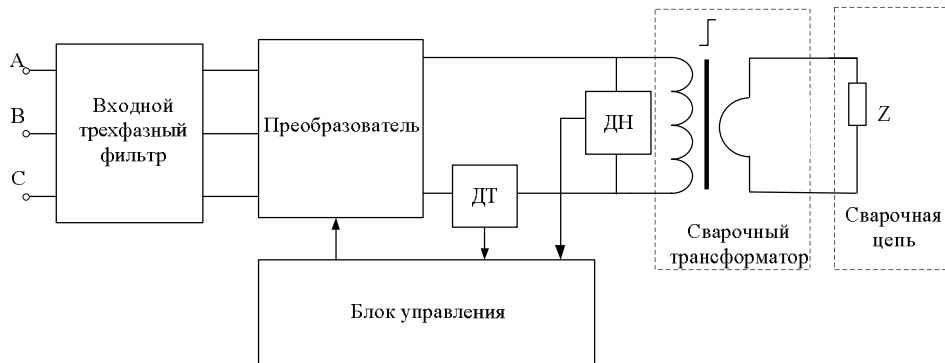


Рис. 1 – Структурная схема сварочного источника питания для контактной сварки

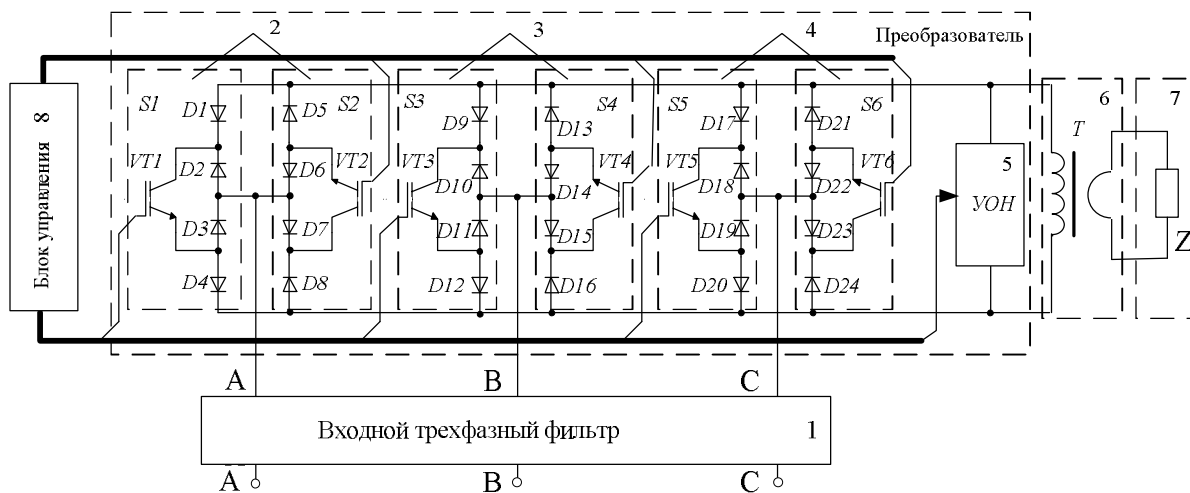


Рис. 2 – Упрощенная схема предложенного сварочного источника питания для контактной сварки

Преобразователь формирует выходное напряжение прямоугольной формы. Это позволяет обеспечить минимум потерь мощности сети из-за того, что преобразователь имитирует симметричную активную нагрузку.

Рассмотрим один период сети (рис. 3). Разобьем его условно на шесть секторов, в каждом из которых будет выполняться следующее условие: два из трех фазных напряжения в течение всего сектора имеют один знак, а третье напряжение имеет противоположный знак (рис. 3) [4].

В таблице приведено распределение ключей по секторам при формировании напряжения положительной и отрицательной полярности.

Скважности управляющих импульсов ключей Q1–Q6 рассчитываются по следующим выражениям:

$$D_1 = \frac{u_A(t)}{R \cdot I(t)}; D_2 = -\frac{u_B(t)}{R \cdot I(t)}; D_3 = -\frac{u_C(t)}{R \cdot I(t)}; \quad (1)$$

$$D_4 = -D_1; D_5 = -D_2; D_6 = -D_3,$$

где  $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$  – мгновенные фазные напряжения сети, В;  $I(t)$  – выходной ток преобразователя, А;  $R$  – имитируемое активное сопротивление, Ом.

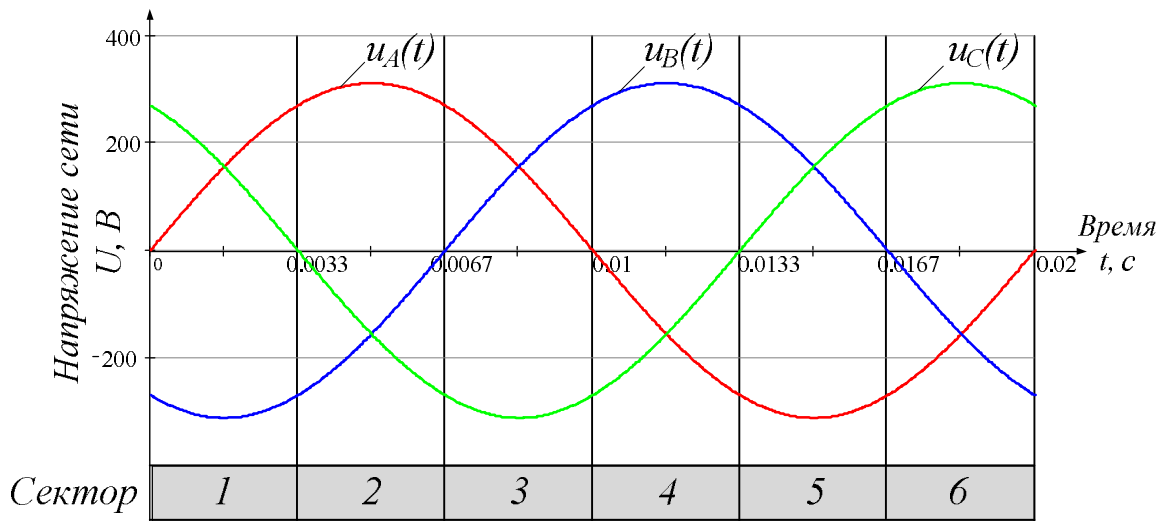


Рис. 3 – Условное разделение периода сети на секторы

Таблица

Сектор	1	2	3	4	5	6
Положительное выходное напряжение						
Переключаются	Q3, Q1, Q2	Q5, Q6, Q4	Q1, Q2, Q3	Q6, Q4, Q5	Q2, Q3, Q1	Q4, Q5, Q6
Включены постоянно	Q5	Q1	Q6	Q2	Q4	Q3
Отрицательное выходное напряжение						
Переключаются	Q6, Q4, Q5	Q2, Q3, Q1	Q4, Q5, Q6	Q3, Q1, Q2	Q5, Q6, Q4	Q1, Q2, Q3
Включены постоянно	Q2	Q4	Q3	Q5	Q1	Q6

Сигналы, пропорциональные рассчитанным скважностям, попадают на ШИМ-генератор, который содержится в блоке управления, а с него – на управляющие электроды транзисторов. Входными сигналами для блока управления являются входные напряжения  $u_A(t)$ ,  $u_B(t)$ ,  $u_C(t)$ , заданное выходное напряжение и модулирующий сигнал несущей частоты ШИМ  $u_{car}(t)$ .

Схема управления формирует симметричную систему потребляемых токов, пропорциональных системе фазных напряжений, что позволяет обеспечить электромагнитную совместимость такого источника питания с электрической сетью.

Изменение полярности выходного напряжения преобразователя позволяет предотвратить насыщение трансформатора. Частота изменения полярности выходного напряжения выбирается минимальной для снижения влияния индуктивности вторичной цепи на сварочный процесс и определяется максимальным потокоцеплением трансформатора.

Уменьшение количества двунаправленных ключей позволяет улучшить технико-экономические показатели предлагаемого источника питания за счет уменьшения его себестоимости, уменьшения потерь переключения и потерь проводимости преобразователя.

При изменении полярности выходного напряжения преобразователя возникает задача рекуперации или диссипации энергии поля рассеяния трансформатора. Так как разработанный преобразователь нерекуперативный, возврат этой энергии в сеть невозможен. Задача ограничения напряжения при смене полярности решена с помощью бездиссипативного квазирезонансного ограничителя напряжения, состоящего из последовательно соединенных конденсатора и двунаправленного ключа (рис. 4). В качестве двунаправленного ключа может быть использован IGBT транзистор, включенный в диагональ диодного моста (к выводам постоянного тока) (VT7, рис. 4).

В блоке управления также происходит расчет момента переключения полярности выходного напряжения и реализуется алгоритм управления ключом устройства ограничения напряжения, основным назначением которого является поглощение энергии, запасенной в магнитной цепи

трансформатора. Алгоритм коммутации ключей при смене полярности (рис. 5) следующий:

1. В момент перед изменением полярности выходного напряжения ключ S1 находится во включенном состоянии. Напряжение на первичной обмотке трансформатора становится близким к нулю, ток протекает через включенный ключ S1.

2. Происходит включение ключа VT7. Конденсатор C подключается параллельно первичной обмотке трансформатора.

3. Выключается ключ S1, включается S2. Ток начинает протекать через конденсатор C. Происходит заряд последнего, ток уменьшается до нуля. После этого конденсатор начинает разряжаться на обмотку трансформатора, ток становится отрицательным, напряжение на конденсаторе уменьшается.

4. Когда напряжение на конденсаторе C доходит до нуля, ток первичной обмотки (в это время отрицательный) «перепрыгивает» в ключ S2.

5. Выключается ключ VT7. Начинается формирование выходного напряжения противоположной полярности.

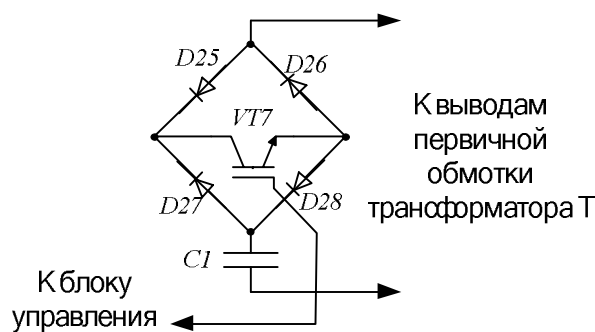


Рис. 4 – Упрощенная схема устройства ограничения напряжения

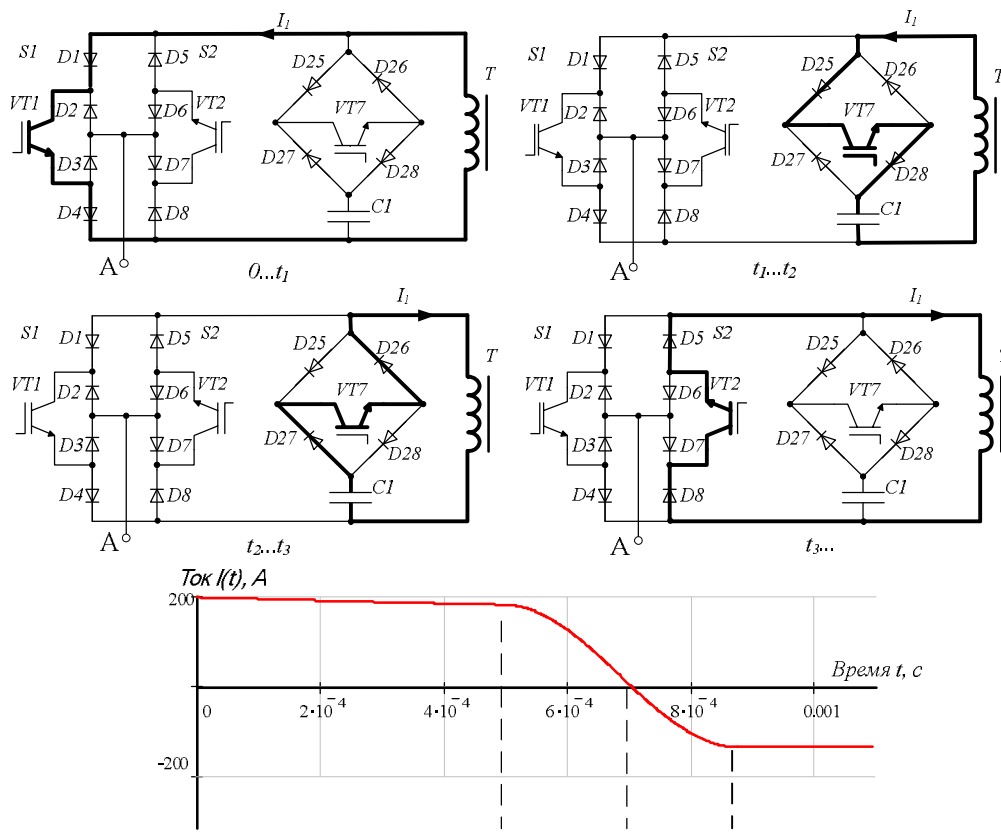


Рис. 5 – Эквивалентные схемы протекания тока при смене полярности

Амплитуда напруги на конденсаторі  $C$  при комутації може бути оцінена в відповідності до наступного вираження:

$$U_c \approx I \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2)$$

де  $L$  – індуктивність трансформатора, приведена до первинної обмотки, Гн;  $I$  – первинний струм в початку комутації, А;  $C$  – ємність конденсатора, Ф.

Ємність конденсатора  $C$  вибирається за допустимим напругою на ньому при протіканні максимально можливого струму в первинній обмотці зварювального трансформатора.

Розрахункові показники розробленого ИП наступні: коефіцієнт несинусоїдальності вхідного струму фази, синхронізованого з вихідним напругою перетворювача, після фільтрації складових на частоті переключення не перевищує 10%; коефіцієнт потужності – 96%; коефіцієнт несиметрії вхідних струмів по зворотній послідовності – не більше 5%.

### Висновки

1. Предложено схемное решение источника питания, который позволяет обеспечить электромагнитную совместимость с питающей сетью за счет формирования симметричной системы входных токов с низким коэффициентом несинусоидальности.

2. В разработанном источнике питания использован принцип непосредственного преобразования энергии, причем силовая часть отличается уменьшенным числом ключевых транзисторов, что позволяет улучшить его технико-экономические показатели.

3. Предложенный источник позволяет обеспечить высокое качество сварных соединений в условиях отклонений напряжения сети за счет применения принципа непосредственного преобразования энергии и максимизации использования силового трансформатора за счет возможности регулирования выходной частоты преобразователя.

### Список использованных источников:

1. Электромагнитная совместимость источников питания сварочной дуги / И.В. Пентегов, С.В. Рымар, А.М. Жерносеков, В.Н. Сидорец // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 3. – С. 34-40.
2. Поліпшення електромагнітної сумісності джерел живлення для систем контактної зварювання / П.С. Сафронов, Ю.В. Бондаренко, О.Ф. Бондаренко, В.М. Сидорець, Д.В. Кучеренко // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – № 5. – С. 89-91.
3. Pismenny A.A. Improvement of Power Efficiency of Machines for Resistance Spot Welding by Longitudinal Compensation of Reactive Power / A.A. Pismenny // *The Paton Welding Journal*. – 2014. – № 1. – С. 25-29.
4. Podnebennaya S.K. On the problem of providing electromagnetic compatibility of power sources of resistance welding machines with electric mains / S.K. Podnebennaya, V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // *The Paton Welding Journal*. – 2016. – № 12. – С. 50-54. – Mode of access: [DOI: 10.15407/tpwj2016.12.09](https://doi.org/10.15407/tpwj2016.12.09).
5. Saleem J. Power Electronics for Resistance Spot Welding Equipment: thesis work for the degree of Licentiate of Technology / J. Saleem. – Sundsvall, 2012. – 42 p.
6. Wagner M. Efficiency improvements for high frequency resistance spot welding / M. Wagner, S. Kolb // *Proceedings of 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*. – Lille, France, 2013. – Pp. 1-9. – Mode of access: [DOI: 10.1109/EPE.2013.6634720](https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6634720).

### References:

1. Pentegov I.V., Rymar S.V., Zhernosekov A.M., Sidorets V.N. Elektromagnitnaia sovместimost' istochnikov pitaniia svarochnoi dugi [Electromagnetic compatibility of arc welding power sources]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2012, no.3, pp. 34-40. (Rus.)
2. Safronov P.S., Bondarenko Yu.V., Bondarenko O.F., Sidorets V.N., Kucherenko D.V. Polipshennia elektromagnitnoї sumisnosti dzherel zhivlennia dla sistem kontaktного zvariuvannia [Increase of Electromagnetic Compatibility of Power Supplies for Resistance Welding]. *Tekhnichna Elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2014, no.5, pp. 89-91. (Ukr.)

3. Pismenny A.A. Improvement of Power Efficiency of Machines for Resistance Spot Welding by Longitudinal Compensation of Reactive Power. *The Paton Welding Journal*, 2014, no.1, pp.25-29.
4. Podnebennaya, S.K., Burlaka, V.V., Gulakov, S.V. On the problem of providing electromagnetic compatibility of power sources of resistance welding machines with electric mains. *The Paton Welding Journal*, 2016, no.12, pp.50-54. doi: 10.15407/tpwj2016.12.09.
5. Saleem J. Power Electronics for Resistance Spot Welding Equipment. Thesis work for the degree of Licentiate of Technology. Sundsvall, 2012. 42 p.
6. Wagner, M., Kolb, S. Efficiency improvements for high frequency resistance spot welding. Proceedings of 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1-9. doi: 10.1109/EPE.2013.6634720.

Рецензент: В.Л. Малинов  
д-р техн. наук, ПІИ ООО «Бюро Веритас Україна»

Статья поступила 15.08.2017

УДК 621.3

© Даєв М.В.<sup>1</sup>, Дерев'ягін В.В.<sup>2</sup>, Бялобржеський О.В.<sup>3</sup>

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВИКРИВЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ДІЛЯНЦІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЗІ ЗВАРЮВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

*В роботі представлена модель системи електроспоживання ділянки цеху промислового підприємства при наявності у вузлі мережі зварювального агрегату. Модель розроблена у пакеті візуального програмування. З використанням відомих показників потужності електричної енергії оцінено вплив зварювальної установки на показники якості електричної енергії. При дослідженні режиму системи електроспоживання з використанням одночастотного фільтру отримано суттєве зниження викривлення струму та, як наслідок, потужності, але при цьому відзначається певне зростання постійної складової потужності та основної її гармоніки.*

**Ключові слова:** вищі гармоніки, зварювальний трансформатор змінного струму, сумарне гармонійне спотворення, імпеданс, показники якості.

*Даев М.В., Деревягин В.В., Бялобржеский А.В. Исследование распределения искривления мощности электроэнергии на участке электроснабжения со сварочной установкой. В работе представлена модель системы электропотребления участка цеха промышленного предприятия при наличии в узле сети сварочного агрегата. Модель разработана в пакете визуального программирования. При использовании известных показателей мощности электрической энергии сделана оценка влияния сварочной установки на показатели качества электрической энергии. При исследовании режима системы электропотребления с использованием одночастотного фильтра получено существенное снижение искривления тока и, как следствие, мощности, но при этом отмечается некое увеличение постоянной составляющей мощности и ее основной гармоника.*

**Ключевые слова:** высшие гармоники, сварочный трансформатор переменного тока, суммарное гармоническое искажения, импеданс, показатели качества.

<sup>1</sup> студент, Кременчуцький Національний Університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, [maksim.daev@gmail.com](mailto:maksim.daev@gmail.com)

<sup>2</sup> студент, Кременчуцький Національний Університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, [dereviahinvladyslav@gmail.com](mailto:dereviahinvladyslav@gmail.com)

<sup>3</sup> д-р техн. наук, доцент, Кременчуцький Національний Університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, [seemal@kdu.edu.ua](mailto:seemal@kdu.edu.ua)