

- Proc. Electric Power Applications. – 2000. – Vol. 147, No 5. – P. 403-413.
3. Singh B. Neural network-based selective compensation of current quality problems in distribution system / B. Singh, V. Verma, J. Solanki // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54, No 1. – P. 53-60.
  4. Escobar G. A model-based controller for a three-phase four-wire shunt active filter with compensation of the neutral line current / G. Escobar, A.A. Valdez, R.E. Torres-Olguin, M.F. Martinez-Montejano // IEEE Trans. on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, No 6. – P. 2261 – 2270.
  5. Pronin M.V. Active filtering network voltages and currents in installations with high-voltage thyristor converters / M.V. Pronin, A.G. Vorontsov // Mining Machinery and Electromechanics. – 2005. – No 5. – P. 41–45. (Rus.)
  6. Selected questions of non-sinusoidal modes in power networks of the enterprises / I.V. Zhezhelenko [etc.]. - M.: Energoatomizdat, 2007. – 296 p. (Rus.)
  7. Sayenko Y.L. Lowering levels of harmonic distortion in electrical networks with sources interharmonics / Y.L. Sayenko, T.K. Baranenko, E.V. Baranenko // Electrification of transport. – 2012. – No 3. – P. 78-83. (Ukr.)
  8. Zhezhelenko I.V. The higher harmonics in power systems / I.V. Zhezhelenko - M.: Energoatomizdat, 2010. – 375 p. (Rus.)
  9. Zhezhelenko I.V. Power quality in industrial plants / I.V. Zhezhelenko, Y.L. Sayenko - M.: Energoatomizdat, 2005. – 261 p. (Rus.)
  10. Sayenko Y.L. Reactive power in supply systems with non-linear loads / Y.L. Sayenko // Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Ser.: Elektryka. – Gliwice, 1991. – Z. 123. – 118 p. (Rus.)
  11. Denysyuk S.P. Analysis and optimization of energy characteristics of systems with electricity converters / S.P. Denysyuk // Technical electrodynamics. Temat. issue. "Electric power plants and electrical systems". – 1999. – P. 129-134. (Ukr.)
  12. Sayenko Y.L. On the question of compensation of reactive power in networks with non-linear loads / / Proceedings of the universities and energy associations of the CIS. Ser. Power engineering. – 2002. – № 4. – P. 11-25. (Rus.)
  13. Vagin G.Y. Electromagnetic compatibility in electric power: a textbook for students of higher educational institutions / G.Y. Vagin, A.B. Loskutov, A.A. Sevostianov. – M.: Publishing Center "Academy", 2010. – 224 p. (Rus.)

Рецензент: В.Ф. Сивокобыленко  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ДонНТУ»

Статья поступила 24.04.2013

УДК 621.341.572

© Бурлака В.В.\*

### ТРЕХФАЗНЫЕ СВАРОЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С АКТИВНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

*Представлены оригинальные схемные решения инверторных источников питания с трехфазным входом, имеющих трансформаторную развязку выхода и использующих технику прямого преобразования трехфазного напряжения в высокочастотное. Применение принципа непосредственного преобразования позволяет уменьшить число элементов в силовой цепи инвертора, повысив тем самым его КПД. Кроме этого, путем применения специального алгоритма управления ключами, возможно достижение входного коэффициента мощности, близкого к единице.*

**Ключевые слова:** источник питания, инвертор, преобразователь, непосредственное преобразование.

\* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

*Бурлака В.В. Трифазні зварювальні джерела живлення безпосереднього перетворення з активною корекцією коефіцієнта потужності. Представлені оригінальні схемні рішення інверторних джерел живлення з трифазним входом, які мають трансформаторну розв'язку виходу та використовують техніку прямого перетворення трифазної напруги в високочастотну. Застосування принципу безпосереднього перетворення дозволяє зменшити число елементів в силовому ланцюзі інвертора, підвищивши тим самим його ККД. Крім цього, шляхом застосування спеціального алгоритму керування ключами, можливе досягнення вхідного коефіцієнта потужності, близького до одиниці.*

**Ключові слова:** джерело живлення, інвертор, перетворювач, безпосереднє перетворення.

*V.V. Burlaka. Three-phase switchmode direct conversion type welding power supplies with active power factor correction. A topology of inverter-type power supply with three-phase input and transformer-isolated output is presented. The power supply is built using the technique of direct conversion of three-phase mains voltage to high-frequency voltage. Applying the principle of direct conversion allows reducing the number of elements in the inverter power path, thus increasing its efficiency. In addition, by using an appropriate control algorithm, it is possible to maintain close to unity input power factor.*

**Keywords:** power supply, inverter, converter, direct conversion.

**Постановка проблеми.** Современные тенденции развития сварочных источников питания определяют повышение требований к эффективности преобразования, увеличение мощности на единицу объема, повышение входного коэффициента мощности (КМ), улучшение качества стабилизации выходного тока или напряжения. Для удовлетворения этих требований в источниках применяется принцип высокочастотного преобразования энергии. При этом подавляющее большинство современных инверторных источников выполнены по схеме двойного преобразования [1]: сетевое напряжение выпрямляется неуправляемым, управляемым или активным выпрямителем, сглаживается и затем поступает на DC-DC преобразователь, выполненный по однотактной [2], полумостовой или мостовой схеме.

Источники, не имеющие активного выпрямителя, характеризуются высоким коэффициентом гармоник потребляемого тока, что приводит к снижению коэффициента мощности, росту потерь в сети и искажению формы кривой напряжения питания. Источники с активным выпрямителем лишены указанного недостатка, но это достигается с помощью применения дополнительного преобразователя, что приводит к снижению КПД на 2-3%.

К общим недостаткам современных сварочных инверторов следует отнести также наличие высоковольтного электролитического конденсатора большой емкости в цепи постоянного тока, что влечет за собой применение специальных мер по ограничению тока его начального заряда при включении источника и дополнительно усложняет схему.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [3] предложен вариант однофазного инверторного источника, в котором исключена функция выпрямления входного напряжения. Получены хорошие результаты по КПД и КМ, но использование низкочастотного трансформатора ведет к ухудшению массогабаритных характеристик подобных устройств. Кроме того, при необходимости сварки на постоянном токе в однофазных источниках в любом случае приходится применять накопитель энергии, обеспечивающий горение дуги в моменты перехода сетевого напряжения через нуль. Это может быть конденсатор фильтра или выходной дроссель. В [3] также обозначена перспективная задача создания трехфазных источников с разделительным высокочастотным трансформатором и непосредственным преобразованием.

**Цель статьи** – разработка сварочного источника питания с непосредственным преобразованием, обладающего следующим набором свойств: повышенной эффективностью преобразования за счет уменьшения числа полупроводниковых элементов в силовой цепи; близким к единице коэффициентом мощности за счет активного управления формой входного тока; отсутствием накопительного конденсатора большой емкости за счет устранения звена постоянного тока.

**Изложение основного материала.** Автором предложена топология силовой части по-

добного источника [4, 5], удовлетворяющая вышеперечисленным требованиям.

Силовая часть источника (рис. 1) выполнена в виде двунаправленного матричного преобразователя 3×2 (VT1 – VT12), подключенного к сети через демпфируемый LC-фильтр (L1 – L3, C1 – C3, R1 – R3) и нагруженного на высокочастотный трансформатор (Т1), ко вторичной обмотке которого подключен выходной высокочастотный двухполупериодный выпрямитель (VD1, VD2) со сглаживающим дросселем (L4) на выходе.

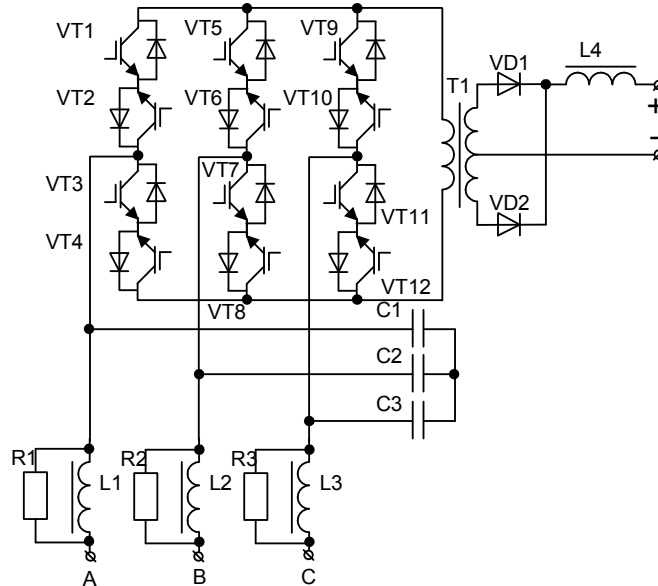


Рис. 1 – Схема силовой части источника с непосредственным преобразованием

Первичная обмотка трансформатора Т1 с высокой частотой (10 – 50 кГц) попеременно подключается к фазам сети, причем для предотвращения межфазных замыканий в каждый момент времени замкнут только один ключ из группы (VT1-VT2, VT5-VT6, VT9-VT10) и один из группы (VT3-VT4, VT7-VT8, VT11-VT12). Конденсаторы С1 – С3 сглаживают импульсные выбросы напряжения в моменты переключения ключей. Последовательность переключения выбирается такой, чтобы за период переключения среднее значение напряжения на первичной обмотке Т1 было равно нулю:

$$\int_0^{T_{sw}} u_{T1} dt = 0, \tag{1}$$

где  $u_{T1}$  – напряжение на первичной обмотке Т1, В;

$T_{sw}$  – период переключения, с.

Это условие необходимо для предотвращения подмагничивания и насыщения магнитопровода Т1. При этом на выходе мостового выпрямителя напряжение будет равно  $\left| \frac{u_{T1}}{K_{T1}} \right|$ , где

$K_{T1}$  – коэффициент трансформации Т1. Среднее (за период переключения) выходное напряжение с учетом выходного фильтра (L4) определяется как:

$$U = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} \left| \frac{u_{T1}}{K_{T1}} \right| dt. \tag{2}$$

Таким образом, изменяя порядок подключения Т1 к фазам сети (соблюдая при этом условие (1)), можно управлять выходным напряжением и, что немаловажно, формой входного тока.

Примем  $t_a, t_b, t_c$  – время подключения трансформатора к фазам А, В, С.

Обозначим  $D_a = t_a/T_{sw}, D_b = t_b/T_{sw}, D_c = t_c/T_{sw}$  – скважности по отношению к фазам А, В, С соответственно. Тогда, пренебрегая током намагничивания Т1, для входных токов рассматриваемого преобразователя можно записать:

$$\begin{aligned} i_a &= I_n \cdot D_a \cdot \text{sign}(u_a), \\ i_b &= I_n \cdot D_b \cdot \text{sign}(u_b), \\ i_c &= I_n \cdot D_c \cdot \text{sign}(u_c), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $I_n$  – приведенный к первичной стороне ток нагрузки;  $u_a, u_b, u_c$  – фазные напряжения сети.

Следует отметить, что токи совпадают по знаку с соответствующим напряжением из-за действия выходного выпрямителя. Для обеспечения близкого к единице коэффициента мощности необходимо, чтобы входной ток в каждой фазе был пропорционален соответствующему фазному напряжению. Это может быть достигнуто путем выбора скважностей следующим образом:

$$\begin{aligned} D_a &= \gamma \cdot |u_a|, \\ D_b &= \gamma \cdot |u_b|, \\ D_c &= \gamma \cdot |u_c|, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, определяющий выходное напряжение.

Среднее за время  $T_{sw}$  напряжение на первичной обмотке трансформатора определяется как

$$U_{T1} = u_a \cdot D_a + u_b \cdot D_b + u_c \cdot D_c, \quad (5)$$

причем знак этого напряжения определяется номерами включенных ключей. Подставив (4) в (5), получим

$$U_{T1} = \gamma \cdot (u_a^2 + u_b^2 + u_c^2) = 1,5\gamma \cdot U_{\text{фм}}^2, \quad (6)$$

где  $U_{\text{фм}}$  – амплитуда фазного напряжения сети, В.

Таким образом, соблюдая условия (4), можно добиться близкого к единице коэффициента мощности источника. Кроме этого, из (6) следует еще один важный вывод: на выходе источника отсутствуют пульсации с частотой сети. Это позволяет значительно повысить качество напряжения преобразователя и уменьшить требования к выходному фильтру.

Схема рис. 1 обладает недостатками: большое количество транзисторов, сложность защитного отключения при аварийных режимах по выходу, большое количество контролируемых параметров и, как следствие, сложная схема управления.

В процессе решения задачи упрощения схемы источника разработан вариант с уменьшенным до 4 числом силовых ключей [6]. Оптимизированная схема силовой части показана на рис. 2.

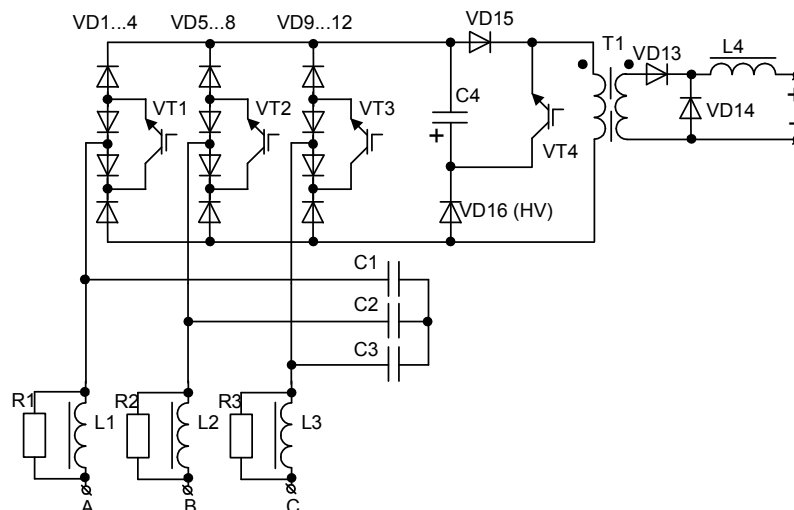


Рис. 2 – Оптимизированная схема с уменьшенным числом ключевых элементов

Вместо шести двунаправленных полупроводниковых ключей применены три диодно-транзисторных коммутатора (VD1 – VD4, VT1; VD5 – VD8, VT2; VD9 – VD12, VT3) и применен однополупериодный (прямоходовый) режим работы высокочастотного трансформатора, для чего магнитопровод последнего выполнен с воздушным зазором.

Это дает сокращение числа транзисторов, но исключает возможность сброса энергии по-

ля трансформатора в сеть, как это происходит в схеме рис. 1. Поэтому для обеспечения размагничивания Т1 в источник введена специальная цепь – элементы VD15, VD16, C4, VT4. На обратном ходу трансформатора энергия, запасенная в его магнитном поле, «перекачивается» в конденсатор C4. Ток первичной обмотки при этом идет по цепи: Т1 – VD16 – C4 – VD15 – Т1. Сброс энергии C4 в нагрузку происходит при открытии транзистора VT4.

Преобразователь (рис. 2) имеет небольшое количество деталей и более простую схему управления и защиты, но требует применения мощного быстродействующего диода VD15, который включен в основную силовую цепь. Кроме того, диод VD16 должен быть рассчитан на удвоенное амплитудное значение линейного напряжения сети. С целью повышения эффективности источника автором разработана модифицированная схема, в которой элементы цепи размагничивания включены параллельно обмотке трансформатора и не создают потерь мощности при прямом ходе [7].

Дальнейшими направлениями исследований в данной области являются:

- разработка источников питания непосредственного преобразования с коррекцией коэффициента мощности, содержащих всего один ключевой элемент [8 – 10];
- разработка источников, способных выполнять функции параллельных активных фильтров высших гармоник [11, 12];
- источников с непосредственным преобразованием и мягкой коммутацией силовых ключей (например, резонансных).

В настоящее время ведется работа над интегрированием функций активной фильтрации высших гармоник в источники с непосредственным преобразованием. Для решения этой задачи разрабатывается система управления преобразователем на базе 32-разрядного микроконтроллера серии STM32 с процессорным ядром ARM Cortex M3.

### Вывод

Применение предложенных схемных решений сварочных инверторных источников питания позволит снизить потери энергии в преобразователе за счет исключения звена постоянного тока, снизить потери в сети и улучшить спектральный состав питающего напряжения за счет активной коррекции коэффициента мощности источника. Эксперименты с маломощными макетами источников, реализованных по схемам рис. 1 и 2, показали работоспособность приведенных схем и алгоритмов управления.

### Список использованных источников:

1. Коротынский А.Е. Состояние, тенденции и перспективы развития высокочастотных сварочных преобразователей (Обзор) / А.Е. Коротынский // Автоматическая сварка. – 2002. – № 7. – С. 50-62.
2. Рудык С.Д. Мощный однотактный преобразователь постоянного напряжения с «мягкой» коммутацией силового ключа / С.Д. Рудык, В.Е. Турчанинов, С.Н. Флоренцев. – Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 55-58.
3. Рудык С.Д. Перспективные источники сварочного тока / С.Д. Рудык, В.Е. Турчанинов, С.Н. Флоренцев. – Электротехника. – 1998. – № 7. – С. 8-13.
4. Патент України № 92420 на винахід. МПК H02H 7/09 Трифазний випрямлювач зварювального струму з безпосереднім перетворенням / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, заявитель и патентообладатель Приазовский государственный технический университет – № а 2009 07499; заявл. 17.07.2009; опубл. 25.10.2010. – Бюл. № 20. – 4 с.
5. Бурлака В.В. Трехфазный инверторный источник питания с непосредственным преобразованием и повышенным коэффициентом мощности / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Автоматическая сварка. – 2012. – № 7 – К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 2012. – С. 44-46.
6. Патент України № 94778 на винахід. МПК H02M 7/00 (2011.01) Джерело живлення з безпосереднім перетворенням / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, заявитель и патентообладатель Приазовский государственный технический университет – № а 2009 06374; заявл. 19.06.2009; опубл. 10.06.2011. – Бюл. № 11. – 3 с.
7. Бурлака В.В. Перспективные сварочные источники с трехфазным питанием / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : тематичний збірник наукових праць / ДДМА. – Краматорськ, 2010. – № 2 (19). – С. 48-51.

8. Design and experimental investigation of a single-switch three-phase flyback-derived power factor corrector / J. Minibock and J.W. Kolar. – in Proc. IEEE INTELEC'00, 2000, pp. 471-478.
9. Direct three-phase single-stage flyback-type power factor corrector / J.W. Kolar and F.C. Zach. – Electron. Lett., vol. 34, June 1998. – p. 1177.
10. Бурлака В.В. Трехфазный обратноходовый источник питания с активной коррекцией коэффициента мощности / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // «Актуальні задачі сучасних технологій»: міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, Тернопіль, 21-22 грудня 2010 р. / ТНТУ ім. І. Пулюя. – Тернопіль, 2010. – С. 109.
11. Бурлака В.В. Активный выпрямитель с интегрированной функцией параллельного активного фильтра / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2011»: Матеріали 7-ої міжнар. молодіжної наук.-техн. конф., 11 – 15 квітня 2011 г. / Вид-во СевНТУ. – Севастополь, 2011. – С. 81.
12. Бурлака В.В. Метод управления корректором коэффициента мощности с интегрированными функциями активного фильтра / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.А. Федоровская // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 226-231.

#### Bibliography:

1. Korotynsky, A.E. Status and trends of high-frequency welding converters (Review) / A.E. Korotynsky // Automatic welding. – 2002. – № 7. – pp. 50-62.
2. Rudyk, S.D. Powerful "soft" switching single-ended DC/DC converter / S.D. Rudyk, V.E. Turchaninov, S.N. Florentsev. – Electrical Engineering. – 1999. – № 4. – pp. 55-58.
3. Rudyk, S.D. Promising welding power supplies / S.D. Rudyk, V.E. Turchaninov, S.N. Florentsev. – Electrical Engineering. – 1998. – № 7. – pp. 8-13.
4. Ukr. patent 92,420. IPC H02H 7/09 Three-phase direct-conversion type power supply for welding / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, the applicant and patentee Priazovskyi State Technical University – № a 2009 07499, appl. 17/07/2009, publ. 25.10.2010. – Bull. Number 20. – 4 p.
5. Burlaka, V.V. Three-phase high power factor direct-conversion type inverter power source / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // Automatic welding. – 2012. – № 7 – К.: PWI. EO Paton, 2012. – pp. 44-46.
6. Ukr. patent 94,778. IPC H02M 7/00 (2011.01) Direct-conversion type power supply / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, the applicant and patentee Priazovskyi State Technical University - № a 2009 06374, appl. 06/19/2009, publ. 10.06.2011. – Bull. Number 11. – 3 p.
7. Burlaka, V.V. Promising three-phase power sources for welding / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // Herald of the Donbass State Engineering Academy: Collection of science papers. – Kramatorsk: DSEA, 2010. – № 2 (19). – pp. 48-51.
8. Design and experimental investigation of a single-switch three-phase flyback-derived power factor corrector / J. Minibock and J.W. Kolar. – in Proc. IEEE INTELEC'00, 2000, pp. 471-478.
9. Direct three-phase single-stage flyback-type power factor corrector / J.W. Kolar and F.C. Zach. – Electron. Lett., vol. 34, June 1998. – p. 1177.
10. Burlaka, V.V. Three-phase flyback power supply with active power factor correction / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // In proc. of "Actual problems of modern technology" intl. conference of young scientists and students, Ternopil, Dec. 21-22, 2010. / TNTU im. I. Puluya. – Ternopil, 2010. – p. 109.
11. Burlaka, V.V. Active rectifier with integrated parallel active filter functionality / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // Modern Issues in Radio Engineering and Telecommunications «RT – 2011»: Materials of the 7-th International Young Scientist Conference, April, 11 – 15, 2011 / SevNTU. – Sebastopol, 2011. – p. 81.
12. Burlaka, V.V. Control method for power factor corrector with integrated active power filter functionality / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.A. Fedorovskaya // Herald of the Priazovskyi State Technical University: Technical Sciences. / PSTU. – Mariupol, 2011. – Vol. 22. – pp. 226-231.

Рецензент: И.В. Жежеленко  
д-р техн. наук, проф., ГБУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 18.02.2013