

В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, А.Ю. Головин, Д.С. Мироненко**МАЛОГАБАРИТНЫЙ СВАРОЧНЫЙ ИНВЕРТОР ДЛЯ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ**

Рассмотрен вопрос особенностей проектирования малогабаритного сварочного инвертора для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током, отличающегося улучшенными массогабаритными характеристиками и сниженными потерями энергии благодаря отсутствию выходного выпрямителя. Показано, что при питании сварочной дуги переменным током высокой частоты, возникают проблемы: изменяющаяся индуктивность сварочного контура представляет на частотах преобразования в десятки кГц значительное реактивное сопротивление, ограничивающее ток дуги; при высокой частоте начинает проявлять себя поверхностный эффект (скин-эффект). Для решения проблемы предложена схема инверторного источника питания с компенсацией реактивного сопротивления путем последовательного включения в сварочную цепь конденсатора и введения частотного управления током получившегося резонансного контура. Целью работы является разработка сварочного инвертора для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током, обеспечивающим качественное протекание процесса. В результате исследования разработан проект и изготовлен малогабаритный сварочный инвертор для полуавтоматической дуговой сварки высокочастотным переменным током. Лабораторные испытания источника показали устойчивое горение дуги и стабильное протекание процесса. Разработанный инвертор может быть легко модифицирован для увеличения сварочного тока. Структура силовой части разработанного сварочного источника позволяет также использовать его для решения задач индукционного нагрева путем подключения к выходным клеммам индуктора индуктивностью $2...7\text{ мкГн}$ и введении в управляющую программу микроконтроллера незначительных корректировок для реализации управления током индуктора. Благодаря повышенному коэффициенту мощности разработанный источник потребляет от сети ток, на $25...40\%$ меньший, чем широко распространенные на рынке сварочные инверторы без корректора коэффициента мощности, что снижает нагрузку на распределительную сеть и позволяет проводить сварочные работы при питании от «слабой» сети или при большой длине сетевого провода.

Сварочный инверторный источник; полуавтоматическая сварка; высокая частота; последовательный резонансный контур; поверхностный эффект.

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, A.Y. Golovin, D.S. Mironenko**SMALL-SIZED WELDING INVERTER FOR SEMI-AUTOMATIC WELDING WITH HIGH FREQUENCY AC CURRENT**

The design of a small-sized high-efficiency welding inverter with high-frequency alternating current output for semi-automatic welding is considered. The inverter is distinguished by good power density and lowered power losses due to absence of output power rectifier. It is shown that when high-frequency alternating current is supplied to the welding arc, several problems arise: the non-constant inductance of the welding circuit presents a significant reactance at conversion frequencies of tens of kHz, limiting the arc current; at high frequency, a surface effect (skin effect) begins to manifest itself. To solve the problem of current limitation, a scheme with reactance compensation is proposed by connecting a capacitor in series with the welding circuit and introducing frequency control of the current in the resulting series-resonant circuit. The aim of the work is to develop a welding inverter for semi-automatic welding with high-frequency alternating current, ensuring high-quality process flow. As a result of the research, a small-sized welding inverter for semi-automatic arc welding with high-frequency alternating current was developed and prototyped. Laboratory tests of the designed inverter have shown steady arc burning and stable process flow. The developed inverter can be easily modified to increase the welding current. The structure of the power section of the developed welding power supply also allows it to be used for induction heating tasks by connecting an inductor with an inductance of $2...7\text{ }\mu\text{H}$ to the output terminals and introducing minor adjustments into the microcontroller control program to implement inductor current control. Thanks to the increased power factor, the developed inverter current drawn from the supply grid is $25...40\%$ lower than that of the widespread welding inverters without a power factor corrector. This reduces the load on the distribution supply grid and allows welding operations to be carried out when powered from a "weak" grid or with a long power cable.

Welding inverter power supply; semi-automatic welding; high frequency; series resonant circuit; skin effect.

Введение. Полуавтоматическая сварка нашла широкое применение в промышленности и быту. Сварка производится сплошной или флюсовой проволокой, подаваемой в сварочную ванну. В зависимости от вида защиты сварочной ванны от внешней среды различают процессы полуавтоматической сварки в среде активного газа (MAG – Metal Active Gas), в среде инертного газа (MIG – Metal Inert Gas) либо самозащищенной флюсовой проволокой (FCAW – Flux Cored Arc Welding).

Для питания электрической дуги при полуавтоматической сварке используются источники с жесткой внешней характеристикой, т.е. с напряжением, слабо зависящим от выходного тока. Сварка может производиться как на прямой, так и на обратной полярности. При использовании флюсовой проволоки диаметром 0,8 – 1,0 мм обычно рекомендуется прямая полярность (отрицательный полюс на электроде).

В качестве источников питания в настоящее время обычно используются сварочные инверторы, отличающиеся хорошими массогабаритными показателями, удобством пользования и широким диапазоном настроек параметров режима сварки.

Инверторный источник состоит из входного выпрямителя, от которого питается инвертор, нагруженный на высокочастотный силовой трансформатор, ко вторичной обмотке которого подключен силовой выпрямитель [1–5]. Инвертор может быть построен с применением большого числа схемных решений и алгоритмов управления [6–10]. Обычно применяются инверторы с «жестким» переключением силовых ключей, а для снижения коммутационных потерь используют цепи формирования траектории переключения [7, 8]. Резонансные преобразователи [11] применяются реже из-за сложности управления при работе на нестационарную нагрузку, которой является электрическая сварочная дуга.

За счет использования различных алгоритмов управления инвертором решаются задачи управления качеством сварочного процесса [12–17]. Это и управление переносом электродного металла, и обеспечение стабильности горения дуги, и облегчение ее поджига (или обеспечение бесконтактного поджига).

Также при проектировании сварочного источника следует учитывать его влияние на сеть [18], которое в общем виде характеризуется коэффициентом мощности. Эмиссия высших гармоник тока в сеть приводит к росту действующего потребляемого тока, искажению формы сетевого напряжения в точке подключения источника, может приводить к некорректной работе иного оборудования, подключенного к сети. Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока нормируется стандартами [19, 20].

Проблемы при дуговой сварке высокочастотным током. Представляет интерес реализация процесса полуавтоматической сварки с питанием дуги высокочастотным переменным током [21]. Дело в том, что на выходной силовой выпрямитель приходится более половины потерь мощности в источнике, поскольку использующиеся в выходном силовом выпрямителе быстровосстанавливающиеся силовые диоды зачастую имеют повышенное прямое напряжение по сравнению с низкочастотными аналогами, при этом они работают со значительными (сварочными) токами. Исключив выходной выпрямитель из источника, можно значительно снизить потери мощности в нем, а также несколько уменьшить его габариты и массу.

Однако, при сварке высокочастотным током возникает ряд специфических проблем.

Во-первых, индуктивность сварочного контура (кабелей и изделия) представляет на частотах преобразования в десятки кГц значительное реактивное сопротивление, ограничивающее ток дуги.

Во-вторых, с повышением частоты начинает проявлять себя поверхностный эффект (скин-эффект), т.е. увеличение активного сопротивления сварочного кабеля из-за протекания тока преимущественно по его поверхности. По этой причине эксперименты по ручной дуговой сварке током высокой частоты, проведенные авторами, оказались неудачными из-за перегрева электродной проволоки, потери ей прочности и осыпания обмазки. Уменьшить негативное влияние скин-эффекта можно, используя сварочные кабели небольшой длины.

Схема силовой части источника. Для решения проблемы индуктивного сопротивления сварочного контура авторами предложен подход к компенсации реактивного сопротивления путем последовательного включения в сварочную цепь конденсатора и вве-

дения частотного управления током получившегося резонансного контура. Поскольку электрическая дуга является нестационарной нагрузкой, система управления должна иметь хорошую динамику и быстро реагировать на изменяющиеся условия горения дуги. Для решения этой задачи разработана методика идентификации параметров резонансного контура, позволяющая сократить время переходного процесса регулирования тока дуги.

Схема силовой части источника приведена на рис. 1.

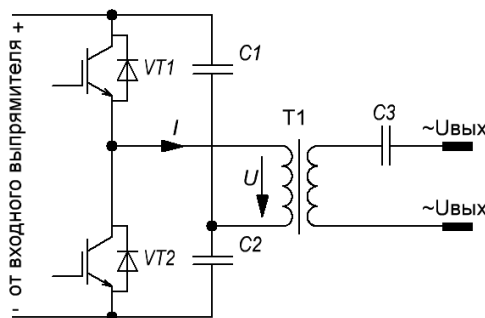


Рис. 1. Схема силовой части источника для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током

Трансформатор Т1 выполнен на ферритовом кольцевом сердечнике и имеет значительную индуктивность обмоток (порядка единиц мГн), намного большую, чем индуктивность цепи нагрузки (единицы-десятки мкГн). Это позволяет без существенной потери точности пренебречь током намагничивания Т1 в дальнейших рассуждениях.

Полумостовой инвертор VT1VT2 нагружен на резонансный последовательный контур. Индуктивность контура образована индуктивностью рассеяния Т1 и приведенной индуктивностью вторичной цепи (т.е. сварочных кабелей). Емкость контура образована параллельно включенными С1 и С2 и последовательно включенной емкостью С3, приведенной к первичной цепи Т1.

Активное сопротивление контура – сумма активных сопротивлений всех элементов – главным образом определяется приведенным к первичной цепи Т1 активным сопротивлением нагрузки.

Проектирование источника. Рассмотрим процесс проектирования источника для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током.

Обозначив напряжение основной гармоники на первичной обмотке Т1 как U , а ток основной гармоники в этой обмотке как I , можно изобразить векторную диаграмму (рис. 2).

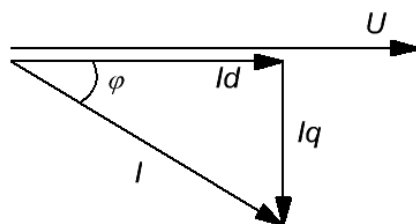


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений и токов первичной обмотки трансформатора

Ток представлен в виде векторной суммы синфазной компоненты, обозначенной I_d , и квадратурной компоненты, обозначенной I_q .

Угол φ сдвига фаз между напряжением и током изображен отрицательным, т.е. ток имеет индуктивный характер и $I_q < 0$. Это основной режим работы инвертора, поскольку при индуктивной нагрузке имеет место «мягкое» включение силовых транзисторов и отсутствуют потери, связанные с обратным восстановлением антипараллельных диодов.

Для измерения тока в системе управления используется АЦП, производящий выборки (отсчеты) тока с 4-кратной частотой переключения инвертора, т.е. с интервалом 90 электрических градусов.

Обозначим отсчеты тока $i_0 \dots i_3$. Отсчеты i_0 и i_1 берутся на положительной полуволне (i_0 синхронизирован с открытием VT1), а i_2 и i_3 – на отрицательной. При согласовании уровней сигнала тока с входом АЦП микроконтроллера в сигнал добавляется постоянная составляющая порядка половины полной шкалы АЦП. Обозначим ее I_0 . Считая ток нагрузки синусоидальным, поскольку из-за высокой добротности нагрузочной цепи токи высших гармоник в ней малы, можно записать:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) + I_0,$$

где ω – частота переключения ключей инвертора.

Подставляя вместо ωt электрические углы $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$, соответствующие выборкам тока, получаем:

$$\begin{aligned} i_0 &= I_m \sin(\varphi) + I_0; \\ i_1 &= I_m \cos(\varphi) + I_0; \\ i_2 &= -I_m \sin(\varphi) + I_0; \\ i_3 &= -I_m \cos(\varphi) + I_0. \end{aligned}$$

Поскольку основная гармоника выходного напряжения инвертора имеет начальную фазу 0, т.е. $u(t) = U_m \sin(\omega t)$, расчет амплитуд синфазной и квадратурной компонент целесообразно проводить следующим образом:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{i_0 - i_2}{2}; \\ I_q &= \frac{i_1 - i_3}{2}. \end{aligned}$$

Далее рассчитывается полный ток $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$.

Постоянная составляющая в сигнале измерения тока определяется как

$$I_{DC} = \frac{i_0 + i_1 + i_2 + i_3}{4}.$$

В установившемся режиме I_{DC} имеет величину половины полной шкалы АЦП, т.е. $I_{DC} \approx I_0$. В переходном же процессе это равенство нарушается из-за появления свободной составляющей тока, что используется для идентификации переходных режимов и исключения использования недостоверных данных при расчетах параметров нагрузочной цепи. Так, в экспериментальной практической реализации программы контроллера данные считаются недостоверными, если $(I_{DC} - I_0)^2 > \frac{I^2}{128}$.

Идентификация параметров контура реализована следующим образом.

Запишем баланс активной мощности:

$$UI \cos \varphi = UI_d = I^2 R,$$

где R – активное сопротивление контура, приведенное к первичной обмотке Т1.

Отсюда

$$R = \frac{UI_d}{I^2}.$$

Баланс реактивной мощности может быть записан следующим образом:

$$UI \sin \varphi = UI_q = I^2 X,$$

где X – реактивное сопротивление контура, приведенное к первичной обмотке Т1.

Отсюда

$$X = \frac{UI_q}{I^2}.$$

Но $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$, где L и C – индуктивность и емкость контура, приведенные к первичной обмотке Т1. Причем емкость C не зависит от цепи нагрузки (которая является активно-индуктивной) и может быть определена как

$$C = C1 + C2 + C3 \cdot K_{T1}^2,$$

где K_{T1} – коэффициент трансформации Т1.

Учитывая это, приведенная индуктивность контура определится как

$$L = \frac{X}{\omega} - \frac{1}{\omega^2 C}.$$

Зная R , L и C нагрузочного контура, можно рассчитать требуемую частоту переключения ω^* для выхода на режим с заданным током I^* при известном напряжении питания U инвертора. Поскольку частота переключения влияет только на реактивную компоненту импеданса контура, запишем требуемое реактивное сопротивление:

$$X^* = \sqrt{\left(\frac{U}{I^*}\right)^2 - R^2}.$$

Требуемая частота при условии работы с индуктивным током:

$$\omega^* = \frac{X^*}{2L} + \sqrt{\left(\frac{X^*}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}.$$

Здесь следует учесть, что определение тока задания I^* должно быть реализовано так, чтобы обеспечить требуемый вид выходной характеристики источника. Так, если требуется получить жесткую характеристику с напряжением U^* на активной нагрузке, то $I^* = \frac{U^*}{R}$.

В некоторых случаях интерес представляет характеристика с постоянной мощностью, тогда $I^* = \sqrt{\frac{P^*}{R}}$, где P^* – уставка по мощности.

Для повышения коэффициента мощности разработанного источника входной выпрямитель выполнен по схеме «Valley-Fill» (рис. 3).

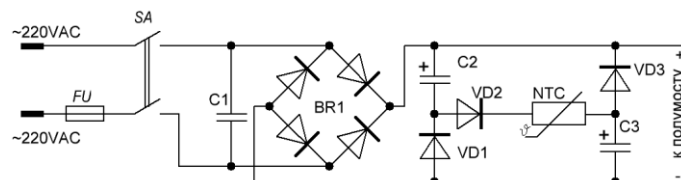


Рис. 3. Входная цепь источника для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током

Конденсатор $C1$ – блокировочный, препятствует проникновению высокочастотных компонент тока в сеть. Цепь Valley-Fill, установленная после диодного моста BR1, обеспечивает поддержание напряжения не ниже половины амплитудного напряжения сети питания. Работает она следующим образом.

При переходе модуля напряжения сети через максимум конденсаторы $C2$ и $C3$ заряжаются по цепи «(+BR1) – $C2$ – $VD2$ – NTC – $C3$ – (–BR1)». Поскольку они при этом включены последовательно, напряжение на каждом из них достигает половины амплитуды напряжения сети. Термистор NTC служит для ограничения начального тока заряда $C2$ и $C3$ при начальном включении источника в сеть выключателем SA.

В течение времени, когда модуль мгновенного напряжения сети меньше напряжения на $C2$ или $C3$, открываются диоды $VD1$ и/или $VD3$, что приводит к подпитке полумоста от $C2$, $C3$. Причем в этом случае конденсаторы включены параллельно. Диоды моста BR1 в это время закрыты и ток от сети не потребляется.

Большую часть времени нагрузка (полумост) питается выпрямленным напряжением сети, диоды VD1 – VD3 закрыты. Эта особенность позволяет путем управления активной мощностью полумоста формировать ток сети таким образом, чтобы его мгновенное значение было пропорционально мгновенному напряжению сети. Тогда схема по отношению к сети будет вести себя как активное сопротивление, что обеспечит повышенный коэффициент мощности. В то же время имеющийся в накопительных конденсаторах C2, C3 запас энергии позволяет обеспечить поддержание горения дежурной дуги во время перехода сетевого напряжения через ноль, тем самым поддерживать стабильность сварочного процесса.

Применение схемы выпрямителя Valley-Fill позволяет: снизить запас энергии в накопительных конденсаторах C2, C3; применить для ограничения тока начального заряда термистор вместо мощного резистора и силового реле; обеспечить стабильность сварочного процесса и повысить коэффициент мощности источника.

На рис. 4 приведены фото платы силовой части описанного источника.



Рис. 4. Плата силовой части источника для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током – слева лицевая сторона, справа – обратная

Управление реализовано на однокристальном микроконтроллере STM32F103C8T6, имеющем два бортовых 12-битных АЦП со скоростью до 1 MSPS каждый. Это позволило выполнять синхронную оцифровку напряжения питания и выходного тока полумоста. Резонансный конденсатор составлен из трех параллельно включенных металлопленочных конденсаторов МКРН по $0,75 \text{ мкФ} \times 1200 \text{ В}$, предназначенных для работы в силовых резонансных контурах.

Вид источника в корпусе приведен на рис. 5.



Рис. 5. Разработанный источник в корпусе – слева; справа – со снятой верхней крышкой

Лабораторные испытания источника показали его работоспособность, стабильность протекания процесса полуавтоматической сварки на переменном токе. Частота тока составляла 50...70 кГц. Для осциллографирования тока применялся специализированный датчик тока CP2100A с частотным диапазоном до 800 кГц. Измерения проводились в первичной цепи высокочастотного силового трансформатора, поскольку датчик CP2100A позволяет измерять ток с амплитудой до 100 А, а действующее значение сварочного тока составляло до 130 А при амплитуде более 180 А, что выходит за пределы рабочего диапазона датчика. Для измерения коэффициента мощности разработанного источника применялся измеритель Everfine PF9901 с пределом измерения по току 40 А. Во время сварки коэффициент мощности источника находился в пределах 0,9...0,95.

Заключение. Разработан и изготовлен малогабаритный сварочный инвертор для полуавтоматической сварки высокочастотным переменным током. Испытания источника при полуавтоматической сварке флюсовой проволокой E71T-GS диаметром 0,8 мм показали устойчивое горение дуги и возможность обеспечения сварочного процесса при питании дуги высокочастотным переменным током. При необходимости сварки проволокой диаметром 1,0...1,2 мм разработанный инвертор может быть легко модифицирован для увеличения сварочного тока.

Структура силовой части источника позволяет также использовать его для решения задач индукционного нагрева путем подключения к выходным клеммам индуктора индуктивностью 2...7 мкГн и введении в управляющую программу микроконтроллера незначительных корректировок для реализации управления током индуктора.

Благодаря повышенному коэффициенту мощности разработанный источник потребляет от сети ток, на 25...40 % меньший, чем широко распространенные на рынке сварочные инверторы без корректора коэффициента мощности, что снижает нагрузку на распределительную сеть и позволяет проводить сварочные работы при питании от «слабой» сети или при большой длине сетевого провода.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0009.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурлака В.В., Гулаков С.В., Головин А.Ю., Федосов А.В., Зареченский Д.А., Псарева И.С. Универсальный аппарат для сварки в полевых условиях // Сварочное производство. – 2024. – № 2. – С. 44-49. – DOI: 10.34641/SP.2024.1065.2.013.
2. Зареченский Д.А., Гулаков С.В., Бурлака В.В., Федосов А.В., Головин А.Ю. Анализ сварочных свойств и энергопотребления однофазных источников питания дуговой сварки // Сварочное производство. – 2024. – № 1. – С. 46-49. – DOI: 10.34641/SP.2024.1064.1.006.
3. Burlaka V., Gulakov S., Podnebennaya S., Kudinova E., Savenko O. Bidirectional single stage isolated DC-AC converter // In proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week), Kharkiv, 05-10 October 2020. – Kharkiv: National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2020. – P. 343-346.
4. Burlaka V.V., Podnebennaya S.K., Gulakov S.V. Low-Cost Transformerless Grid-Tie Inverter for Photovoltaic System // In proceedings of 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, 17-19 April, 2019. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. – P. 334-338.
5. Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. Power Supply of Resistance Welding Machine with Reactive Power Compensation // In proceedings of 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics And Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 16-18 April, 2019. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. – P. 648-651.
6. Бардин А., Джаникян А., Никитин С., Романов А. Инверторное сварочное оборудование // Силовая электроника. – 2008. – № 3. – С. 116-119.
7. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter Yungtaek Jang and Milan M. Jovanovic', Power Electronics Laboratory, Delta Products Corporation, P. O. Box 12173, 5101 Davis Drive, Research Triangle Park, NC 27709, 2006.
8. Петров С. Схемотехника промышленных сварочных инверторов // Современная электроника. – 2007. – № 8. – С. 42-47.
9. Петров С. Однотактный прямоходовой мостовой конвертер: области применения и развитие схемотехники // Силовая электроника. – 2009. – № 5. – С. 74-81.
10. STMicroelectronics, AN3200 “2.5 kW MMA welding machine”, September 2010.

11. *Верещаго Е.Н., Квасницкий В.Ф., Костюченко В.И.* Квазирезонансный источник питания Plasma 110i HF для плазменной резки // Сварочное производство. – 2008. – № 6. – С. 37-41.
12. *Schupp J., Fischer W., and Mecke H.* Welding Arc Control with Power Electronics // IEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conference. – 2000. – P. 443-450.
13. *Tomsic M.J., Crump N. and others.* The welding handbook: Welding processes. – Vol. 2. – 8th ed. American Welding Society. Miami (USA). – P. 2-29, 73-80.
14. *Савчук В.С., Плехов А.С.* Управление сварочным инвертором для электросварки труб высокого давления // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 4. – С. 43-54. – DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43.
15. *Володин В.Я.* Продвинутые источники сварочного тока // Силовая электроника. – 2014. – № 4.
16. *Фурман Е.Л., Толстых Л.Г., Толстых А.Л., Лепинских В.Б.* Импульсный инверторный источник ИНТАЛ-500И для сварки // Сварочное производство. – 2015. – № 10. – С. 40-43.
17. *Князьков А.Ф., Князьков С.А., Деменцев К.И.* Инверторный источник питания для сварки модулированным током // Сварочное производство. – 2008. – № 5. – С. 18-22.
18. *Коротынский А.Е., Копиленко Е.А., Павленко Г.В., Павленко Г.Л.* Оценка параметров электромагнитной совместимости оборудования для дуговой сварки // Сварочное производство. – 2005. – № 11. – С. 9-12.
19. ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 28 с.
20. ГОСТ Р 51317.3.4-2006 (МЭК 61000-3-4:1998). Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 16А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 15 с.
21. *Бардин В.М., Борисов Д.А.* Целесообразность и возможности создания сварочных аппаратов переменного тока высокой частоты // Сварочное производство. – 2010. – № 6. – С. 35-38.

REFERENCES

1. *Burlaka V.V., Gulakov S.V., Golovin A.Yu., Fedosov A.V., Zarechenskiy D.A., Psareva I.S.* Universal'nyy apparat dlya svarki v polevykh usloviyakh [Universal device for welding in the field], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2024, No. 2, pp. 44-49. DOI: 10.34641/SP.2024.1065.2.013.
2. *Zarechenskiy D.A., Gulakov S.V., Burlaka V.V., Fedosov A.V., Golovin A.Yu.* Analiz svarochnykh svoystv i energopotrebleniya odnofaznykh istochnikov pitaniya dugovoy svarki [Analysis of welding properties and energy consumption of single-phase arc welding power sources], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2024, No. 1, pp. 46-49. DOI: 10.34641/SP.2024.1064.1.006.
3. *Burlaka V., Gulakov S., Podnebennaya S., Kudinova E., Savenko O.* Bidirectional single stage isolated DC-AC converter, *In proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week), Kharkiv, 05-10 October 2020*. Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2020, pp. 343-346.
4. *Burlaka V.V., Podnebennaya S.K., Gulakov S.V.* Low-Cost Transformerless Grid-Tie Inverter For Photovoltaic System, *In proceedings of 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, 17-19 April, 2019*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019, pp. 334-338.
5. *Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V.* Power Supply of Resistance Welding Machine with Reactive Power Compensation, *In proceedings of 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics And Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 16-18 April, 2019*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019, pp. 648-651.
6. *Bardin A., Dzhanikyan A., Nikitin S., Romanov A.* Invertornoe svarochnoe oborudovanie [Inverter welding equipment], *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2008, No. 3, pp. 116-119.
7. A New PWM ZVS Full-Bridge Converter Yungtaek Jang and Milan M. Jovanovic', Power Electronics Laboratory, Delta Products Corporation, P. O. Box 12173, 5101 Davis Drive, Research Triangle Park, NC 27709, 2006.
8. *Petrov S.* Skhemotekhnika promyshlennykh svarochnykh inverterov [Circuitry of industrial welding inverters], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2007, No. 8, pp. 42-47.
9. *Petrov S.* Odnostaktnyy pryamokhodovoy mostovoy konverter: oblasti primeneniya i razvitie skhemotekhniki [Single-ended forward bridge converter: areas of application and development of circuitry], *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2009, No. 5, pp. 74-81.
10. STMicroelectronics, AN3200 "2.5 kW MMA welding machine", September 2010.
11. *Vereshchago E.N., Kvasnitskiy V.F., Kostyuchenko V.I.* Kvazirezonsnnyy istochnik pitaniya Plasma 110i HF dlya plazmennoy rezki [Quasi-resonant power source Plasma 110i HF for plasma cutting], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2008, No. 6, pp. 37-41.

12. Schupp J., Fischer W., and Mecke H. Welding Arc Control with Power Electronics, *IEEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conference*, 2000, pp. 443-450.
13. Tomsic M.J., Crump N. and others. The welding handbook: Welding processes, Vol. 2. 8th ed. American Welding Society. Miami (USA), pp. 2-29, 73-80.
14. Savchuk V.S., Plekhov A.S. Upravlenie svarochnym invertorom dlya elektrosvarki trub vysokogo davleniya [Control of a welding inverter for electric welding of high-pressure pipes], *Intellektual'naya elektrotehnika* [Intelligent electrical engineering], 2023, No. 4, pp. 43-54. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43.
15. Volodin V.Ya. Prodvinutye istochniki svarochnogo toka [Advanced welding current sources], *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2014, No. 4.
16. Furman E.L., Tolstykh L.G., Tolstykh A.L., Lepinskikh V.B. Impul'snyy invertornyy istochnik INTAL-500I dlya svarki [Pulse inverter source INTAL-500I for welding], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2015, No. 10, pp. 40-43.
17. Knyaz'kov A.F., Knyaz'kov S.A., Dementsev K.I. Invertornyy istochnik pitaniya dlya svarki modulirovannym tokom [Inverter power source for welding with modulated current], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2008, No. 5, pp. 18-22.
18. Korotynskiy A.E., Kopilenko E.A., Pavlenko G.V., Pavlenko G.L. Otsenka parametrov elektromagnitnoy sovmestimosti oborudovaniya dlya dugovoy svarki [Evaluation of electromagnetic compatibility parameters of arc welding equipment], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2005, No. 11, pp. 9-12.
19. GOST R 51317.3.2-2006 (MEK 61000-3-2:2005). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Emissiya garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom ne bolee 16A (v odnoy faze). Normy i metody ispytaniy [GOST R 51317.3.2-2006 (IEC 61000-3-2:2005). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Emission of harmonic components of current by technical equipment with a consumed current of no more than 16 A (in one phase). Standards and test methods]. Moscow: Standartinform, 2007, 28 p.
20. GOST R 51317.3.4-2006 (MEK 61000-3-4:1998). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ogranichenie emissii garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom bolee 16A, podklyuchaemymi k nizkovol'tnym sistemam elektrosnabzheniya. Normy i metody ispytaniy [GOST R 51317.3.4-2006 (IEC 61000-3-4:1998). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Limitation of emission of harmonic components of current by technical equipment with a consumed current exceeding 16 A, connected to low-voltage power supply systems. Standards and test methods]. Moscow: Standartinform, 2007, 15 p.
21. Bardin V.M., Bopisov D.A. Tselesoobpaznost' i vozmozhnosti sozdaniya svapochnykh apparatov pepemennogo toka vysokoy chastoty [Feasibility and possibilities of creating high-frequency alternating current welding machines], *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], 2010, No. 6, pp. 35-38.

Бурлака Владимир Владимирович – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497048603; научно-технический центр силовой электроники; д.т.н.; доцент; директор центра.

Гулаков Сергей Владимирович – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497298638; научно-технический центр силовой электроники; д.т.н.; профессор.

Головин Андрей Юрьевич – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497128054; научно-технический центр силовой электроники; м.н.с.

Мироненко Дмитрий Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885153109; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Burlaka Vladimir Vladimirovich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497048603; Scientific and Technical Center for Power Electronics; dr. of eng. sc.; associate professor; director of the center.

Gulakov Sergey Vladimirovich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497298638; Scientific and Technical Center for Power Electronics; dr. of eng. sc.; professor.

Golovin Andrey Yurievich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497128054; Scientific and Technical Center for Power Electronics; research associate.

Mironenko Dmitrii Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885153109; the Department of Software Engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.