

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Досліджено гармонійний склад електричної мережі при роботі однофазних інверторних і трансформаторних зварювальних джерел живлення. Встановлено, що інверторні джерела живлення генерують у мережу широкий спектр вищих гармонік струму, особливо струми нульової послідовності, що погіршує їх електромагнітну сумісність і потребує застосування фільтрів вищих гармонік струму. Трансформаторні джерела живлення генерують значно менші гармоніки струму і мають хорошу електромагнітну сумісність.

Исследован гармонический состав электрической сети при работе однофазных инверторных и трансформаторных сварочных источников питания. Установлено, что инверторные источники питания генерируют в сеть широкий спектр высших гармоник тока, особенно токи нулевой последовательности, что ухудшает их электромагнитную совместимость и требует применения фильтров высших гармоник тока. Трансформаторные источники питания генерируют значительно меньшие гармоники тока и обладают хорошей электромагнитной совместимостью.

ВВЕДЕНИЕ

Сварка плавлением является основным технологическим процессом сварочного производства, в особенности электродуговая сварка, на которую приходится до 80 % объема сварочных работ [1, 2]. Ручная дуговая сварка, несмотря на интенсивное развитие механизированной и автоматической сварки, по-прежнему востребована и остается актуальной в серийном производстве, при ремонтных работах, в отдельных частях технологических процессов, таких как специальные врезки на магистральных трубопроводах и др. Ручная дуговая сварка покрытыми электродами позволяет осуществлять одно- и многопроходную сварку конструкций с различной конфигурацией швов во всех пространственных положениях, а также швов, расположенных в труднодоступных местах. Важным при таком способе сварки является также возможность легирования металла швов, как через химический состав покрытия электродов, так и через металл электродных стержней.

Это способствует интенсивному развитию источников питания для ручной дуговой сварки, в особенности транзисторных инверторных источников питания сварочной дуги. При этом доля традиционных сварочных источников питания, выполненных на базе сварочных трансформаторов, уменьшается.

Инверторные источники питания сварочной дуги [3] обладают малыми габаритами и массой, обеспечивают высокое качество сварных соединений, позволяют формировать необходимую вольт-амперную характеристику и потребляют небольшую мощность, но остаются по-прежнему достаточно дорогими, не надежными в эксплуатации и требуют наличия сервисных центров с высококвалифицированным персоналом.

Трансформаторные сварочные источники питания имеют большую массу, но на порядок дешевле инверторных источников питания, надежны и неприхотливы в эксплуатации. К тому же не исчерпаны все возможности их совершенствования с целью улучшения их технических, эксплуатационных и экономических показателей [4].

В последнее десятилетие все промышленно развитые страны стали уделять особое внимание энергосберегающим технологиям и качеству электроэнергии элект-

рических сетей. Вызвано это тем, что в начале 90-х годов они столкнулись с проблемой постоянного ухудшения качества электроэнергии питающих сетей, заключающейся в искажении синусоидальной формы напряжения и тока. Это незамедлительно привело к повышению потерь и понижению надежности эксплуатации электрооборудования. Такое явление вызвано увеличением количества оборудования с нелинейными трехфазными и однофазными нагрузками, которые генерируют в электрическую сеть высшие гармоники тока.

Однофазные импульсные источники питания с бестрансформаторным входом, выпрямители, инверторы, частотно-управляемые электроприводы, компьютерные системы, телекоммуникационная и офисная аппаратура, энергосберегающие лампы и другие однофазные нелинейные нагрузки, из-за своей массовости привели к увеличению коэффициента нелинейных искажений (гармоник) тока THD_I (Total Harmonic Current Distortion [5]) до 90-140 %, особенно за счет генерации в сеть 3-ей и кратных ей гармоник тока до 80% (токи нулевой последовательности) [6]. Высшие гармоники тока увеличивают коэффициент нелинейных искажений напряжения THD_U (Total Harmonic Voltage Distortion) сетей, доводя его до 7 % и выше.

Нелинейные нагрузки ухудшают электромагнитную совместимость, что приводит к ненадежной работе электрического и электронного оборудования [5, 6], ускоренному старению изоляции, коррозии элементов заземлений, перегреву роторов и износу подшипников электродвигателей. За счет преобладания в сети 3-ей и кратных ей гармоник может возникать реверсное вращение асинхронных электродвигателей и подгорание изоляции нулевых проводов при превышении тока в нулевом проводе выше проектного уровня.

В Украинских и Европейских стандартах, определяющих параметры качества однофазных сетей, не установлены уровни коэффициента нелинейных искажений тока, а ограничены значения токов конкретных гармоник. В Украине стандарт касается только однофазных сетей с током не более 16 А [7]. В Северной Америке [8] и странах Евросоюза уровни THD_I стандартизированы для трехфазных сетей. В связи с этим можно прогнозировать введение в Украине норм, определяющих допустимые уровни коэффи-

ента THD_I для однофазных сетей.

Приемлемые значения коэффициента THD_U ограничены 3 % для индивидуальных нелинейных нагрузок. Допустимое значение определено 5 % для совокупных нагрузок сети [8]. Отечественные нормативные документы [7] допускают значение THD_U до 8 %, при котором уже существенно искажается синусоидальное напряжения сети.

Однофазные сварочные источники питания, в которых применяется электрическая дуга, являющаяся нелинейной нагрузкой, сварочные выпрямители и инверторы, также являются генераторами высших гармоник тока. В связи с этим, актуально уменьшение уровня гармоник тока при работе сварочного оборудования, особенно при продвижении отечественных сварочных технологий и оборудования в промышленно развитые страны.

Целью статьи является исследование воздействия на электрическую сеть однофазных инверторных и трансформаторных источников питания сварочной дуги.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЕТЬ ОДНОФАЗНЫХ СВАРОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Исследовались следующие сварочные источники питания, питающиеся от однофазной сети переменного тока частотой 50 Гц:

- промышленно выпускаемый Опытным заводом сварочного оборудования Института электросварки им. Е.О. Патона однофазный транзисторный инверторный источник питания ВДИ-L-200, предназначенный для ручной дуговой сварки низкоуглеродистых и легированных сталей, многих цветных металлов (кроме алюминиевых и титановых сплавов) любыми видами электродов;

- промышленно выпускаемый тем же заводом однофазный сварочный трансформатор с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния и магнитным шунтом СТШ-250 (на сварочный ток до 250 А), снабженный устройством стабилизации горения сварочной дуги [9]. Источник питания имеет плавное регулирование сварочного тока и предназначен для ручной дуговой сварки штучными электродами переменного и постоянного тока;

- разработанный в Институте электросварки им. Е.О. Патона однофазный сварочный источник питания с конденсаторным множителем напряжения ВДУ-125-У3 (выпрямитель дуговой универсальный на сварочный ток до 125 А), состоящий из сварочного трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния и конденсаторного множителя напряжения с мостовой диодной схемой выпрямления [4, 10]. Множитель напряжения обеспечивает улучшенное начальное зажигание сварочной дуги, зажигание дуги после перехода тока через ноль, и стабильное ее горение. Источник питания изготавливался в ИЭС им. Е.О. Патона и небольшими партиями в Институте электродинамики НАН Украины. Источник имеет ступенчатое регулирование сварочного тока и предназначен для ручной дуговой сварки штучными электродами переменного тока.

Измерительным прибором служил анализатор

качества электрической сети (одной фазы) Chauvin Arnoux С.А. 8230 (Франция), позволяющий получать временные зависимости тока и напряжения с их характерными значениями (максимальное и минимальное значение, полная, активная и реактивная мощность и т.п.) и спектры гармоник.

Полученные экспериментальные данные сведены в табл. 1, в которой даны обозначения: I, U – действующие значения тока и напряжения; S, P, Q – полная, активная и реактивная мощности; $\cos\varphi$ – коэффициент сдвига фаз между током и напряжением – косинус угла φ .

Таблица 1
Основные параметры сети при работе источников
питания сварочной дуги

Параметры	ВДИ-L-200	СТШ-250	ВДУ-125
I_{m+}, A	59,5	80,8	30,2
U_{m+}, B	312,9	310,6	304,5
I_{m-}, A	-59,6	-74,3	-33,3
U_{m-}, B	-313,1	-313,2	-304,3
I, A	36,8	41,0	23,8
U, B	221,5	221,0	210,6
$S, B \cdot A$	8282,5	9895,9	5008,3
$P, Вт$	6130,1	2787,2	3701,6
$Q, B \cdot Ap$	5569,6	9495,2	3373,6
$\cos\varphi$	0,980	0,280	0,764
THD_I	86,366	15,983	16,879
THD_U	5,957	3,110	2,256
K	7,259	1,383	1,309

В таблице приведены и расчетные данные, которые получались на основании экспериментальных данных. Расчетными данными были следующие.

Коэффициенты нелинейных искажений тока THD_I и напряжения THD_U для 1-й гармоники тока и напряжения определяются по формулам [8]:

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_{h\%}^2}; \quad THD_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} U_{h\%}^2}, \quad (1)$$

где h – номер гармоники (h_{\max} – максимальный номер); $I_{h\%}, U_{h\%}$ – значения тока и напряжения в процентах от действующего значения тока и напряжения 1-й гармоники: $I_{h\%} = I_h/I_1, U_{h\%} = U_h/U_1$.

Еще один параметр, K -фактор, определяет увеличение добавочных потерь в электрическом оборудовании и проводниках электрических сетей, по сравнению с током 1-й гармоники:

$$K = \sum_{h=1}^{h_{\max}} (h \cdot I_{h\%})^2 / \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_{h\%}^2. \quad (2)$$

Добавочные потери вызываются вихревыми токами, протекающими в токоведущих частях и проводниках оборудования и электрических сетей. Сами вихревые токи обусловлены магнитными потоками рассеяния, проходящими через токоведущие части и проводники [11].

Рассмотрим работу с сетью сварочного инверторного источника питания [3] ВДИ-L-200, принципиальная схема работы которого показана на рис. 1.

На рис. 2,а приведены зависимости от времени t относительных мгновенных значений тока i_* и напряжения u_* в питающей сети при работе сварочного инвертора. Значения получены при сварке стали Ст.3 электродами УОНИ 13/55, диаметр 5мм, сварочный

ток 200 А. Величины i^* и u^* отнесены к наибольшим амплитудным значениям: $i^* = i/|I_m|$ и $u^* = u/|U_m|$. Значения $|I_m| = 59,6$ А, $|U_m| = 313,1$ В выбраны из табл. 1, где приведены наибольшие "+" и наименьшие "-" амплитудные значения напряжения и тока за период I_{m+} , I_{m-} , U_{m+} , U_{m-} , полученные в опыте.

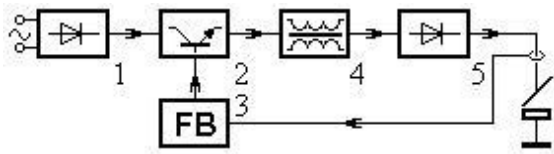


Рис. 1. Блок-схема инверторного источника питания ВДИ-L-200: 1 – однофазный выпрямитель; 2 – высокочастотный инвертор; 3 – блок регулирования; 4 – высокочастотный трансформатор; 5 – выпрямитель и фильтр

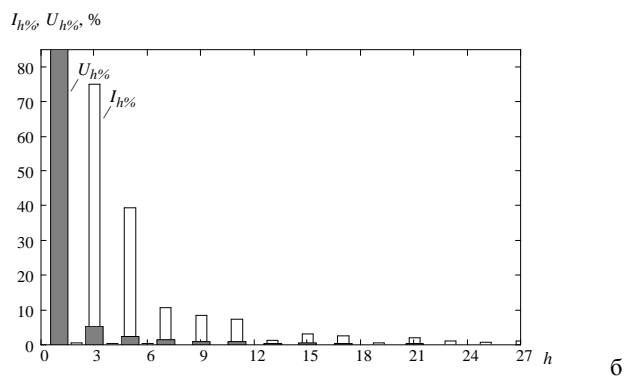
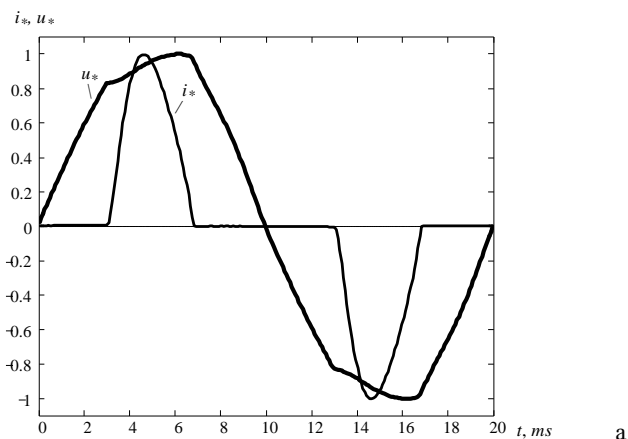


Рис. 2. Ток и напряжение в сети однофазного транзисторного инверторного источника питания ВДИ-L-200 (а); гармонический состав тока и напряжения сети (б)

На рис. 2,б показана диаграмма гармонических составляющих h тока $I_h\%$ и напряжения $U_h\%$. В питающей сети источника выражены практически все нечетные гармоники тока, в частности 3-я гармоника тока, составляющая 75,1% от 1-й гармоники, 5-я – 39,5%, 7-я – 10,5%, 9-я – 8,3%, 11-я – 7,4%. Нечетные номера гармоник напряжения, превосходящие 1%: 3-я – 5,2%, 5-я – 2,2%, 7-я – 1,4%.

Коэффициенты нелинейных искажений тока и напряжения источника питания ВДИ-L-200 равны: $THD_I = 86,4\%$, $THD_U = 5,9\%$, К-фактор равен 7,2.

Кривая тока на рис. 2,а представляет собой короткий импульс вблизи амплитуды напряжения сети

на фоне почти нулевых значений на остальном протяжении полупериода и для источника питания ВДИ-L-200 коэффициент THD_I довольно высокий. При этом в сеть генерируются очень широкий спектр гармонических составляющих тока. Кривая напряжения имеет срезы в области экстремумов, поэтому амплитуды гармонических составляющих напряжения также высоки. Такая форма кривой напряжения может приводить к ложным срабатываниям устройств бесперебойного питания, подключенным к той же сети, которые включаются при понижении амплитудного значения напряжения сети.

При изменении режима сварки эти значения изменяются, при этом, коэффициент THD_I лежит в диапазоне 82-121,5%, а коэффициент THD_U – в диапазоне 2,8-6,7%.

Гармоники, генерируемые инверторным источником питания, являются следствием работы выпрямителя с емкостным буфером, а не сварочной дуги.

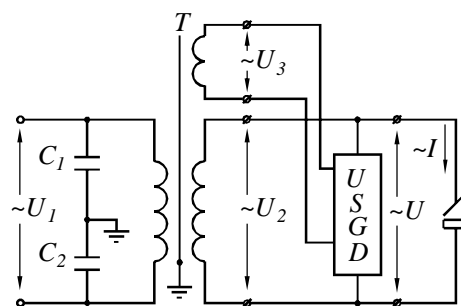


Рис. 3. Электрическая схема однофазного сварочного трансформатора СТШ-250 со стабилизатором горения сварочной дуги

Рассмотрим работу сварочного трансформатора СТШ-250 снабженного устройством стабилизации горения сварочной дуги, принципиальная электрическая схема которого показана на рис. 3. На рисунке обозначено: U_1 , U_2 – напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора T ; U_3 – напряжение на дополнительной обмотке трансформатора, питающей устройство стабилизации горения сварочной дуги $USGD$; C_1 , C_2 – конденсаторы емкостного фильтра источника питания от радиопомех; U , I – напряжение на клеммах источника и ток в сварочной цепи.

На рис. 4,а приведены зависимости от времени относительных значений тока и напряжения в питающей сети при работе сварочного трансформатора. Значения получены при сварке нержавеющей стали 12Х18Н10Т штучным электродом ОЗЛ-8, диаметром 3 мм и сварочным током 90 А. Амплитудные значения тока и напряжения равны: $|I_m| = 80,8$ А, $|U_m| = 313,2$ В.

Форма кривых тока и напряжения незначительно отличаются от синусоидальной. Наблюдается наложение кратковременного импульса, соответствующего импульсу стабилизатора, и небольшой излом кривой тока при переходе через нуль.

На рис. 4,б показана диаграмма гармонических составляющих тока и напряжения. Из диаграммы видно, что в питающей сети при работе сварочного трансформатора выражены 3-я гармоника тока, составляющая 15,3% от 1-й гармоники и 5-я – 2,3%, остальные нечетные гармоники тока не превосходят 1%.

Нечетные номера гармоник напряжения имеют значения: 3-я – 2,5%, 5-я – 1,3%, 9-я – 1%.

Коэффициенты нелинейных искажений тока и напряжения трансформатора СТШ-250 равны: $THD_I = 15,9\%$, $THD_U = 3,1\%$, K -фактор равен 1,38.

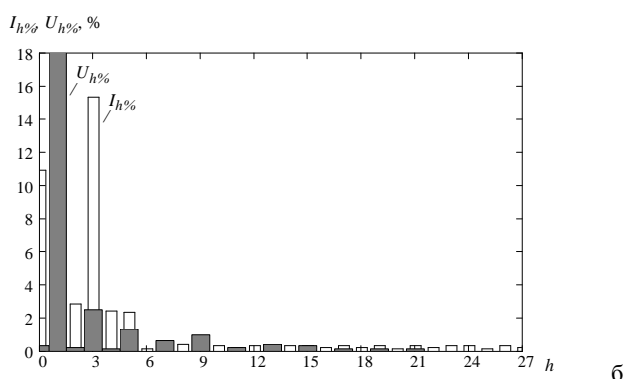
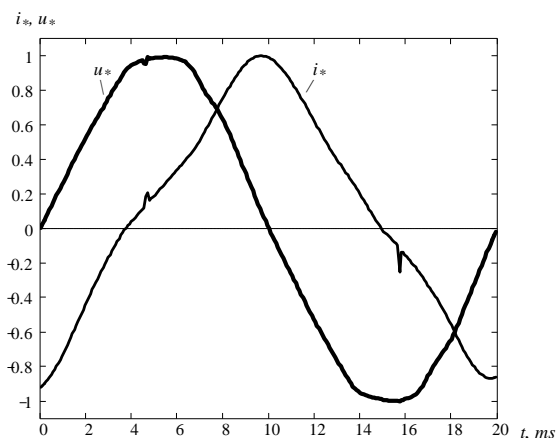


Рис. 4. Ток и напряжение в питающей сети однофазного сварочного трансформатора СТШ-250 с устройством стабилизации горения сварочной дуги (а); гармонический состав тока и напряжения сети (б)

Гармоники, генерируемые трансформаторным источником питания, в основном определяются сварочной дугой.

Добавочные потери в сети и оборудовании при работе сварочного трансформатора при данном виде его нагрузки, увеличиваются в 1,38 раза.

При изменении режима сварки эти значения меняются, при этом, коэффициент THD_I лежит в диапазоне 13-24 %, а коэффициент THD_U – в диапазоне 2,5-3,5 %. Эти результаты подтверждают теоретический анализ гармонического состава переменного тока дуги [12], которая питается от сварочного трансформатора.

Сварочный трансформатор СТШ-250 генерирует в питающую сеть не очень большие гармонические составляющие тока. Хотя и они могут отрицательно сказаться на работе оборудования, подключенного к сети. Значение THD_U так же невелико.

Рассмотренные характеристики присущи и другим типам однофазных сварочных трансформаторов.

Рассмотрим работу однофазного сварочного источника питания с конденсаторным умножителем напряжения ВДУ-125-У3, принципиальная электрическая схема которого показана на рис. 5. На рисунке

обозначено: U_1, U_2 – напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора T ; UN – блок конденсаторного умножителя напряжения; VD_1 - VD_4 – диоды выпрямительного моста; C_1, C_2 и R_1, R_2 – электролитические конденсаторы и резисторы умножителя напряжения; U, I – напряжение на клеммах источника и ток в сварочной цепи.

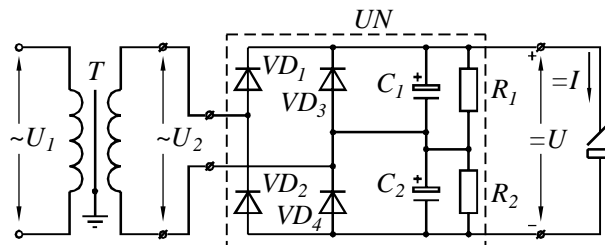


Рис. 5. Электрическая схема однофазного сварочного источника питания с конденсаторным умножителем напряжения ВДУ-125

На рис. 6,а приведены зависимости от времени относительных значений тока и напряжения в питающей сети при работе сварочного источника питания ВДУ-125. Характеристики снимались при сварке штучным электродом АНО-22, диаметром 3 мм и сварочным током 120 А. Наибольшие амплитудные значения токов и напряжений в опыте были равны: $|I_m| = 33,3$ А, $|U_m| = 304,5$ В. После перехода тока через нуль на синусоидальный ток накладывается небольшое возмущение, обусловленное работой умножителя напряжения. Форма напряжения очень близка к синусоидальной.

На рис. 6,б показана диаграмма гармонических составляющих тока и напряжения.

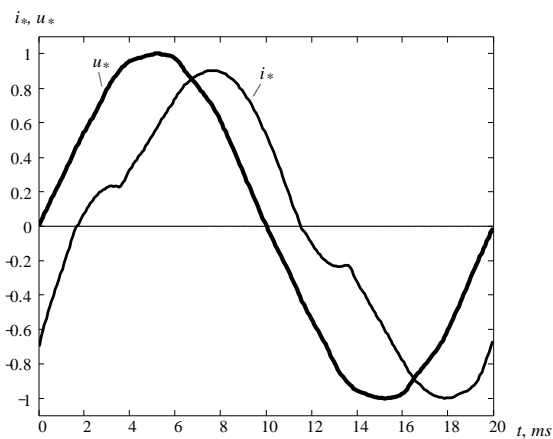
Из диаграммы видно, что в питающей сети при работе источника выражены 3-я гармоника тока, составляющая 15,6% от 1-й гармоники, 5-я – 4,6%, остальные нечетные гармоники тока не превосходят 1%. Нечетные номера гармоник напряжения, превосходящие 1% от 1-й гармоники имеют значения: 3-я – 1,6%, 5-я – 1,1%.

Коэффициенты нелинейных искажений тока и напряжения: $THD_I = 16,9\%$, $THD_U = 2,2\%$. K -фактор равен 1,31.

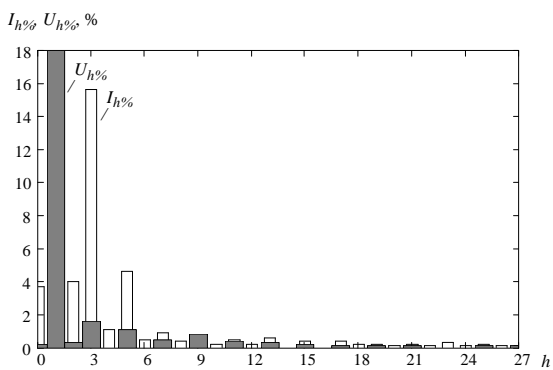
Сварочный источник питания ВДУ-125 имеет не очень высокие значения THD_I и THD_U . Добавочные потери в сетях и оборудовании при работе источника питания, при данном виде его нагрузки, увеличиваются в 1,31 раза, за счет чего данный источник можно отнести к категории энергосберегающих.

При изменении режима сварки эти значения изменяются, при этом, коэффициент THD_I лежит в диапазоне 8,7-20,8 %, а коэффициент THD_U – в диапазоне 2,2-2,8 %.

Рассмотренные характеристики присущи всем типам сварочных источников питания с конденсаторным умножителем напряжения, с разными видами сварочных трансформаторов, выполненными по такой же схеме: ВДУ-140-У3, ВДУ-160-У3 и ВДУ-180-У3, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона.



а



б

Рис. 6. Ток и напряжение в питающей сети однофазного сварочного источника питания с конденсаторным умножителем напряжения ВДУ-125-У3 (а); гармонический состав тока и напряжения сети (б)

Также был исследован однофазный трансформаторный сварочный источник питания с конденсаторным умножителем напряжения и тиристорным регулированием сварочного тока ВДУ-201-У3 (на ток сварки до 200 А), разработан в ИЭС им. Е.О. Патона. Источник питания состоит из сварочного трансформатора с развитыми магнитными потоками рассеяния, конденсаторного умножителя напряжения с мостовой тиристорной схемой выпрямления, параллельно включенного дополнительного диодного мостового выпрямителя и фазосдвигающего реактора для обеспечения непрерывности сварочного тока при работе тиристоров. Коэффициенты нелинейных искажений тока и напряжения источника имели значения: $THD_I = 9,5-46,5 \%$, $THD_U = 1,8-3,9 \%$, К-фактор был равен 1,3-3,5. Отметим, что при номинальном сварочном токе, когда тиристоры полностью открыты, характеристики источника питания ВДУ-201-У3, по воздействию на сеть, близки к характеристикам источника питания ВДУ-125-У3.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Не смотря на все свои преимущества (малую массу, обеспечение заданной формы вольтамперной характеристики, высокий $\cos\phi$ и др.), сварочные инверторы генерируют в сеть наиболее широкий спектр гармонических составляющих тока и существенно искажают синусоидальную кривую тока и напряжения. Также они создают радиопомехи [13]. Это свидетельствует об

их плохой электромагнитной совместимости.

Полученные данные говорят о том, что для улучшения качества электроэнергии и снижения уровня генерируемых сварочным оборудованием высших гармоник тока и напряжения при работе инверторных источников питания необходимо применение фильтров высших гармоник тока. К подобным выводам также пришли китайские исследователи [14]. Так же необходимо применение фильтров совместно со сварочными трансформаторными источниками питания, у которых регулирование тока осуществляется электронными ключами (тиристорами). При этом исследованные сварочные источники питания, помимо обеспечения ими необходимых технологических показателей, будут иметь хорошую электромагнитную совместимость, снижать добавочные потери в проводах сети и подключенном к сети оборудовании.

Отметим положительные свойства трансформаторов и трансформаторных источников питания сварочной дуги, у которых регулирование сварочного тока осуществляется самим трансформатором [15] (без электронного блока регулирования тока). Именно эти источники, помимо своей технологичности, надежности и небольшой стоимости, менее всего воздействуют на сеть. Обусловлено это тем, что сварочный трансформатор имеет повышенную индуктивность рассеяния для обеспечения падающей вольтамперной характеристики [15, 16], что способствует уменьшению высших гармоник тока. Конденсаторы умножителя напряжения и сварочный трансформатор с развитыми магнитными потоками рассеяния, вообще, образуют своеобразный внутренний фильтр высших гармоник тока источника питания. Но сами высшие гармоники тока, в абсолютных значениях, довольно велики, поэтому для однофазных сварочных трансформаторов и источников питания, выполненных на их основе, не обязательно, но желательно применение фильтров высших гармоник тока.

Трансформаторные источники питания сварочной дуги, несмотря на их повышенную массу, обладают многими положительными свойствами и по праву занимают свое место на рынке сварочного оборудования. Поэтому такие источники питания, наряду с инверторными источниками, необходимо и в дальнейшем развивать и совершенствовать. Можно, например, использовать конденсаторные умножители напряжения, позволяющие существенно уменьшить массу трансформатора и потребляемый из сети ток, за счет пониженного вторичного напряжения. Применение устройств стабилизации горения сварочной дуги, позволяет достичь той же цели, к тому же, использовать при сварке электроды постоянного тока. Также перспективно совершенствование трансформаторных источников питания сварочной дуги, имеющих индуктивно-емкостную цепь, разработанных в Институте электросварки им. Е.О. Патона [17].

Наименьшая стоимость среди всех типов источников питания – основное достоинство источников питания с конденсаторными умножителями напряжения. При насыщенности рынка инверторными источниками питания источники с конденсаторными умножителями напряжения могут быть конкурентоспо-

собными благодаря своей низкой стоимости. Они выгодно отличаются от обычных сварочных трансформаторов массогабаритными характеристиками: примерно в 1,5-2 раза легче и в 1,5 раза меньшим уровнем тока, потребляемым из сети, более высоким коэффициентом полезного действия и коэффициентом мощности [4]. По массе, коэффициенту полезного действия, коэффициенту мощности, току, потребляемому из сети, источники питания с конденсаторными умножителями напряжения приближаются к инверторным источникам питания.

Отрицательным влиянием однофазных сварочных источников питания для сетей, в отличие от трехфазных источников, является то, что они значительно загружают нулевой провод высшими гармониками тока нулевой последовательности, не предназначенный для больших нагрузок. Поэтому, помимо резонансных индуктивно-емкостных фильтров высших гармоник тока [18], нужно применять автотрансформаторные фильтры токов нулевой последовательности [19, 20], предназначенные для трехфазных четырехпроводных сетей. Подобные фильтры, к тому же, симметрируют сеть. Они могут подключаться параллельно с сетью на входе в предприятие или здание, а также несколько фильтров по длине сети. В ряде случаев целесообразно применение с однофазными сварочными источниками питания, у которых наблюдается пониженное значение коэффициента мощности ($\cos\phi$), устройств компенсации реактивной мощности.

Такие фильтры практически не генерируют в сеть реактивную мощность и обладают повышенной надежностью при работе в "некачественных" сетях, обеспечивая снижение коэффициента THD_I до 5-15 % в однофазных сетях.

В Украине Институт электросварки им. Е.О. Патона и Институт электродинамики НАН Украины имеют большой опыт по разработке методик расчета параметров сетей и устройств подавления высших гармоник тока для улучшения электромагнитной совместимости.

ВЫВОДЫ

Значение коэффициента нелинейных искажений тока THD_I при работе однофазных сварочных источников питания лежит в диапазоне 8,7-121,5, а напряжения THD_U – 2,2-6,7 %, что свидетельствует о плохой электромагнитной совместимости большинства однофазных сварочных источников питания. Особенно опасна генерация третьей и кратных ей гармоник тока.

Коэффициент, учитывающий увеличение добавочных потерь от вихревых токов в оборудовании и сетях – K -фактор равен 1,38-7,3 %, что не позволяет отнести все однофазные сварочные источники питания к категории энергосберегающих. Лишь один источник питания с конденсаторным умножителем напряжения, у которого K -фактор был равен 1,31 %, можно назвать энергосберегающим.

Наиболее широкий спектр высших гармоник тока генерируют однофазные сварочные инверторы, которые более всего искажают синусоидальную форму тока и напряжения сети, что требует обязательного применения фильтров высших гармоник тока.

Совместно с однофазными источниками питания сварочной дуги целесообразно применение фильтров высших гармоник тока и фильтров токов нулевой последовательности, которые снижают коэффициент нелинейных искажений тока до значений 5-15 %. Для инверторных источников и трансформаторных источников, в которых регулирование тока осуществляется тиристорами, применение фильтров необходимо. Для ряда источников питания целесообразно использование устройств компенсации реактивной мощности.

Установлено, что однофазные трансформаторные источники питания, в которых регулирование сварочного тока осуществляется самим трансформатором (без электронного регулирования тока), помимо своей технологичности, надежности и небольшой стоимости, оказывают наименьшее влияние на сеть.

Трансформаторные источники питания сварочной дуги обладают многими положительными свойствами, в частности хорошей электромагнитной совместимостью, и по праву занимают свое место на рынке сварочного оборудования. Поэтому создание источников питания сварочной дуги на основе трансформаторов необходимо развивать и совершенствовать, например, используя конденсаторные умножители напряжения, устройства стабилизации горения сварочной дуги или индуктивно-емкостную цепь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патон Б.Е. Проблемы сварки на рубеже веков // Автоматическая сварка. – 1999. – № 1. – С. 4-14.
2. Лебедев В.К. Современные тенденции развития сварочных источников питания // Новые сварочные источники питания: Сб. науч. тр. – К.: АН Украины. ИЭС им. Е.О. Патона, 1992. – С. 5-13.
3. Схемотехника инверторных источников питания для дуговой сварки / Е.Н. Верещаго, В.Ф. Квасницкий, Л.Н. Мирощинченко, И.В. Пентегов. – Николаев: УГМТУ, 2000. – 283 с.
4. Пентегов И.В., Рымар С.В., Латанский В.П. Перспективы развития новых типов трансформаторов для ручной дуговой сварки // Вісник Призовського державного технічного університету. – Маріуполь: ПДТУ, 2000. – Вип. № 10. – С. 217-223.
5. Paice D.A. Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse Methods for Clean Power. – NY: IEEE PRESS, 1995. – 202 p.
6. Пентегов И.В., Волков И.В., Levin M. Устройства подавления высших гармоник тока // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – К.: ІЕД НАНУ, 2002. – Ч. 1. – С. 13-22.
7. ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004. Електромагнітна сумісність. Ч. 3-2: Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше 16 А на фазу). – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 18 с.
8. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems : IEEE Standard 519-1992. – IEEE Standards Board, 1992. – 93 p.
9. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги / Б.Е. Патон, И.И. Заруба, В.В. Дыменко, А.Ф. Шатан. – К.: Екотехнологія, 2007. – 248 с.
10. Пентегов И.В., Латанский В.П., Склифос В.В. Малогабаритные источники питания с улучшенными энергетическими показателями // Новые сварочные источники питания: Сб. науч. тр. – К.: АН Украины. ИЭС им. Е.О. Патона. – 1992. – С. 66-71.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1964. – 750 с.
12. Сидоренко В.Н., Кункин Д.Д., Москович Г.Н. Гармонический анализ переменного тока электрической сварочной

дуги // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – С. 219-222.

13. Оценка параметров электромагнитной совместимости оборудования для дуговой сварки / А.Е. Коротынский, Е.А. Копиленко, Г.В. Павленко, Г.Л. Павленко // Сварочное производство. – 2005. – № 11. – С. 9-12.

14. Suppression Technology of Electromagnetic Disturbance for IGBT Inverter Welder / Jie-Guang Xiao, Min-Zhou Xing, Gang Xiong, Yi Li, Ming-Hong Luo // Dian Han Ji Electric Welding Machine. – 2009. – V. 39. – No. 12. – P. 39-42.

15. Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966. – 360 с.

16. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.

17. Коротынский А.Е. Ограничение напряжения холостого хода в резонансных сварочных источниках // Автоматическая сварка. – 2001. – № 2. – С. 46-49.

18. Улучшение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий посредством фильтров высших гармоник тока / И.В. Волков, М.Н. Курильчук, И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць. Енергетика. – Маріуполь: ПДТУ, 2005. – Ч. 2, вип. № 15. – С. 15-19.

19. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.

20. Пат. на винахід UA 88912 C2 Україна, МПК (2009) H01F27/24. Трифазний фільтр гармонік струмів нульової послідовності автотрансформаторного типу / І.В. Пентегов, І.В. Волков, С.В. Римар, В.М. Безручко, Б.Б. Ларченко, Г.С. Кривенко, М.І. Левін (Україна (UA)); Чернігівський державний технологічний університет (UA). – № а 2007 01489; Заявл. 12.02.2007; Опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 4 с.

Bibliography (transliterated): 1. Paton B.E. Problemy svarki na rubezhe vekov // Avtomaticheskaya svarka. - 1999. - № 1. - S. 4-14. 2. Lebedev V.K. Sovremennye tendencii razvitiya svarochnyh istochnikov pitaniya // Novye svarochnye istochniki pitaniya: Sb. nauch. tr. - K.: AN Ukrainy. GES im. E.O. Patona, 1992. - S. 5-13. 3. Shemotehnika invertornyh istochnikov pitaniya dlya dugovoy svarki / E.N. Vereschago, V.F. Kvasnickij, L.N. Miroschnichenko, I.V. Pentegov. - Nikolaev: UGMTU, 2000. - 283 s. 4. Pentegov I.V., Rymar S.V., Latanskij V.P. Perspektivy razvitiya novyh tipov transformatorov dlya ruchnoj dugovoy svarki // Visnik Priazovskogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu. - Mariupol': PDTU, 2000. - Vip. № 10. - S. 217-223. 5. Paice D.A. Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse Methods for Clean Power. - NY: IEEE PRESS, 1995. - 202 p. 6. Pentegov I.V., Volkov I.V., Levin M. Ustrojstva podavleniya vysshih garmonik toka // Tehnichna elektrodinamika: Tem. vipusk. Problemi suchasnoi elektrotehniki. - K.: IED NANU, 2002. - Ch. 1. - S. 13-22. 7. DSTU IEC 61000-3-2:2004. Elektromagnitna sumisnist'. Ch. 3-2: Normi. Normi na emisiju garmonik strumu (dlya sili vhidnogo strumu obladnannya ne bil'she 16 A na fazu). - K.: Derzhspozhivstandart Ukraini, 2007. - 18 s. 8. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems : IEEE Standard 519-1992. - IEEE Standards Board, 1992. - 93 p. 9. Svarochnye istochniki pitaniya s impul'snoj stabilizaciej gorenija dugi / B.E. Paton, I.I. Zaruba, V.V. Dymenko, A.F. Shatan. - K.: Ekotehnologiya, 2007. - 248 s. 10. Pentegov I.V., Latanskij V.P., Sklifos V.V. Malogabaritnye

istochniki pitaniya s uluchshennymi `energeticheskimi pokazatelyami // Novye svarochnye istochniki pitaniya: Sb. nauch. tr. - K.: AN Ukrainy. GES im. E.O. Patona. - 1992. - S. 66-71. 11. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy `elektrotehniki. - M.: Vyssh. shk., 1964. - 750 s.

12. Sidorec V.N., Kunkin D.D., Moskovich G.N. Garmonicheskij analiz peremennogo toka `elektricheskoy svarochnoj dugi // Tehnichna elektrodinamika: Tem. vipusk. Silova elektronika ta energoefektivnist'. Ch. 1. - K.: IED NANU, 2011. - S. 219-222. 13. Ocenka parametrov `elektromagnitnoj sovmestivosti oborudovaniya dlya dugovoy svarki / A.E. Korotynskij, E.A. Kopilenko, G.V. Pavlenko, G.L. Pavlenko // Svarochnoe proizvodstvo. - 2005. - № 11. - S. 9-12. 14. Suppression

Technology of Electromagnetic Disturbance for IGBT Inverter Welder / Jie-Guang Xiao, Min-Zhou Xing, Gang Xiong, Yi Li, Ming-Hong Luo // Dian Han Ji Electric Welding Machine. - 2009. - V. 39. - No. 12. - P. 39-42. 15. Paton B.E., Lebedev V.K. `Elektrooborudovanie dlya dugovoy i shlakovoy svarki. - M.: Mashinostroenie, 1966. - 360 s. 16. Tehnologiya `elektricheskoy svarki metallov i splavov plavlaniem / Pod red. akad. B.E. Patona. - M.: Mashinostroenie, 1974. - 768 s. 17. Korotynskij A.E. Ogranichenie napryazheniya holostogo hoda v rezonansnyh svarochnyh istochnikah // Avtomaticheskaya svarka. - 2001. - № 2. - S. 46-49.

18. Uluchshenie kachestva `elektro`energii v setyah promyshlennyh predpriyatij posredstvom fil'trov vysshih garmonik toka / I.V. Volkov, M.N. Kuril'chuk, I.V. Pentegov, S.V. Rymar // Visnik Priazovskogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu. Zb. nauk. prac'. Energetika. - Mariupol': PDTU, 2005. - Ch. 2, vip. № 15. - S. 15-19. 19. Shidlovskij A.K., Kuznecov V.G. Povyshenie kachestva `energii v `elektricheskikh setyah / A.K. Shidlovskij, V.G. Kuznecov. - K.: Nauk. dumka, 1985. - 268 s. 20. Pat. na vinahid UA 88912 C2 Ukraini, MPK (2009) H01F27/24. Trifaznij fil'tr garmonik strumiv nul'ovoї poslidoynosti avtotransformatornogo tipu / I.V. Pentegov, I.V. Volkov, S.V. Rymar, V.M. Bezruchko, B.B. Larchenko, G.S. Krivenko, M.I. Levin (Ukraina (UA)); Chernigivskij derzhavnij tehnologichnij universitet (UA). - № a 2007 01489; Zayavl. 12.02.2007; Opubl. 10.12.2009, Byul. № 23. - 4 s.

Поступила 20.09.2011

Пентегов Игорь Владимирович, д.т.н., проф., в.н.с.

Рымар Сергей Владимирович, д.т.н., с.н.с., в.н.с.

Жерносеков Анатолий Максимович, к.т.н., с.н.с., с.н.с.

Сидорец Владимир Николаевич, д.т.н., с.н.с., в.н.с.

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11

тел. (044) 206-13-88, e-mail: magn@i.com.ua

тел. (044) 205-25-33, e-mail: elmag@paton.kiev.ua

тел. (044) 200-44-78, e-mail: maximan23@i.ua

тел. (044) 205-23-49, e-mail: sidvn@ua.fm

Pentegov I.V., Rymar S.V., Zhernosekov A.M., Sydorets V.N.

Electromagnetic compatibility of arc welding power sources.

Harmonic composition of electric mains under operation of single-phase inverter and transformer welding power sources has been investigated. It is revealed that the inverter power sources generate a wide spectrum of major current harmonics, especially zero-sequence currents, in the mains, which worsens their electromagnetic compatibility and requires application of major current harmonics filters. The transformer power sources generate considerably-smaller current harmonics and are characterized by good electromagnetic compatibility.

Key words – harmonics, electromagnetic compatibility, welding power sources, inverter, transformer.