

В.Н. СИДОРЦЬ, д-р техн. наук, вед. н.с., ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

Д.Д. КУНКИН, м.н.с., ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

С.В. РЫМАР, д-р техн. наук, вед. н.с., ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

А.М. ЖЕРНОСЕКОВ, канд. техн. наук, с.н.с., ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ СВАРОЧНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ С ЕМКОСТНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ ТОКА

The current and voltage harmonics structure in electric power network at manual arc welding by means of a welding power source with capacitive limitation of its current are investigated. It is shown, that this source generates in the network high-order current and voltage harmonics much lower levels than the inverter current type ones.

Исследован гармонический состав тока и напряжения электрической сети в процессе ручной дуговой сварки источником питания с емкостным ограничением сварочного тока. Показано, что этот источник генерирует в электрическую сеть высшие гармоники тока и напряжения, уровень которых гораздо ниже, чем у сварочных инверторных источников питания.

Досліджено гармонічний склад струму та напруги електричної мережі в процесі ручного дугового зварювання джерелом живлення з ємнісним обмеженням зварювального струму. Показано, що це джерело генерує в електричну мережу вищі гармоніки струму та напруги, рівень яких значно нижче, ніж у зварювальних інверторних джерел живлення.

Введение. В последнее десятилетие наметилась устойчивая тенденция развития сварочных источников питания инверторного типа и постепенное вытеснение ими с рынка сварочного оборудования источников питания других типов. Однако, сварочные инверторы, наряду со многими преимуществами, не лишены недостатков. Среди них – высокая стоимость, сложность конструкции и низкая ремонтпригодность, которая в условиях отсутствия развитой сети сервисных центров, приводит к большим расходам на обслуживание. Еще одним их существенным недостатком является высокое значение коэффициентов нелинейных искажений тока (THD_I) и напряжения (THD_U), что приводит к понижению качества потребляемой электроэнергии и несоответствию

его требованиям стандартов [1-3].

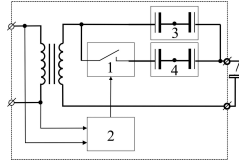
В тоже время, традиционные однофазные источники питания на базе сварочных трансформаторов еще остаются востребованными, благодаря их простоте, надежности, ремонтпригодности и конкурентоспособной себестоимости. Поэтому их совершенствование и развитие является актуальным. В Институте электросварки (ИЭС) им. Е.О. Патона этому направлению уделяют большое внимание. Основные усилия направлены на снижение массы и габаритов традиционных однофазных источников питания до уровня сравнимого с инверторными источниками питания. В этом направлении были достигнуты определенные успехи. Кроме того, были проведены сравнительные исследования параметров электроэнергии сварочных источников питания, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона. Так в работе [4] было показано, что традиционные источники питания СТШ-250 (серийно выпускаемый однофазный сварочный трансформатор с устройством стабилизации горения дуги), ВДУ-125 (однофазный сварочный источник питания с конденсаторным умножителем напряжения) и ВДУ-201 (однофазный сварочный источник питания с конденсаторным умножителем напряжения и тиристорным регулированием сварочного тока) в сравнении со сварочными инверторами обладают на порядок меньшими значениями TND_f и соответствуют требованиям международных стандартов качества электроэнергии.

В ряду с перечисленными выше традиционными сварочными источниками питания находится источник питания с емкостным ограничением сварочного тока (ИПЕОТ), который был разработан в ИЭС им. Е.О. Патона для сварки модулированным током тонколистового металла в различных пространственных положениях [5]. Структурная схема, циклограмма работы и внешний вид ИПЕОТ показаны на рис. 1. Особенностью схемы такого источника является наличие двух конденсаторных батарей в сварочном контуре переменного тока. Емкость конденсаторов в сочетании с индуктивностью рассеяния трансформатора, образует последовательный индуктивно-емкостной контур.

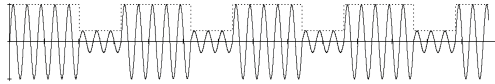
Некоторые исследователи считают [6, 7], что соотношение параметров контура должно соответствовать условию резонанса, т.е. равенству собственной частоты контура и сети. Нами установлено, что собственная частота контура мало влияет на технологический процесс. Это позволило не придерживаться строго установленного значения параметров контура, и избежать бестоковых пауз во время модуляции сварочного тока.



а



б



в

Рис. 1. Внешний вид (а), блок-схема (б) и циклограмма работы (в) сварочного источника питания с емкостным ограничением тока дуги для сварки с модуляцией: 1 – тиристорный ключ; 2 – система управления модуляцией; 3 – базовая конденсаторная батарея; 4 – дополнительная конденсаторная батарея.

Более того, наши теоретические исследования показали [8], что для цепи с емкостным ограничением сварочного тока уровень высших гармоник ниже, чем для цепи с только индуктивным ограничением сварочного тока.

Цель и задачи исследований – экспериментально исследовать гармонический состав тока и напряжения в процессе ручной дуговой сварки ИПЕОТ и провести анализ полученных результатов.

Описание и результаты эксперимента. В экспериментах были использованы такие режимы сварки:

1 – минимальный ток без модуляции,

2 – максимальный ток с модуляцией на частоте 1,25 Гц, длительность цикла импульса – $T_{\text{и}} = 0,5$ с, длительность цикла паузы – $T_{\text{п}} = 0,3$ с (рис.1,в).

Наплавка образца стали Ст3 толщиной 4 мм выполнялась электродами для сварки переменным током – MONOLIT, аналогом АНО-21, $\varnothing 2$ мм (в режиме 1) и $\varnothing 4$ мм (в режиме 2). Во время регистрации параметров питающей сети длина дуги поддерживалась постоянной.

Измерительным прибором параметров потребляемой электроэнергии служил анализатор качества электрической сети (одной фазы) Chauvin Arnoux С.А. 8230 (Франция), позволяющий получать временные зависимости тока и напряжения, их характерные значения; данные полной, активной и реактивной мощности; гармонический состав тока и напряжения, а также рассчитывать их коэффициенты нелинейных искажений.

Полученные экспериментальные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1 Основные параметры сети при работе ИПЕОТ

Параметры	режим	
	1	2
Действующее значение тока I , А	8,1	15,4
Действующее значение напряжения U , В	222,3	217,4
Полная мощность S , кВ·А	1,8	3,4
Активная мощность P , кВт	1,6	3,35
Реактивная мощность Q , квар	-0,68	0,66
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,923	0,981
Коэффициент нелинейных искажений тока THD_I , %	15	7,3
Коэффициент нелинейных искажений напряжения THD_U , %	2,9	2,7
K -фактор	1,17	1,09

Анализ полученных данных показывает, что для ИПЕОТ показатели полностью удовлетворяют европейскому стандарту качества электроэнергии EN50160 [1]. Иллюстрацией этого факта является близкая к синусоидальной форма потребляемого тока и напряжения сети при испытании ИПЕОТ в режиме 1, осциллограмма которого представлена на рис. 2,а.

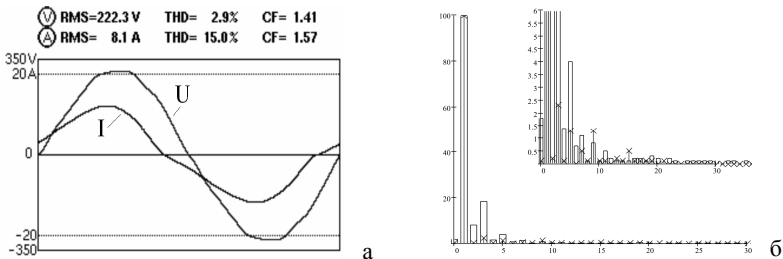


Рис. 2. Осциллограммы потребляемого тока и напряжения – (а) и их гармонический состав – (б) при работе ИПЕОТ в режиме 1: \times – гармонический состав напряжения; \square – гармонический состав тока.

На гистограммах, приведенных рис. 2,б в разных масштабах, можно видеть, что третья гармоника потребляемого тока источника питания не превышает 19% от первой, последующие гармоники – менее 4%. По данным табл. 1, коэффициенты нелинейных искажений по току и напряжению не превышают 15% и 2,9% соответственно. K -фактор [4], определяющий во сколько раз увеличатся добавочные по-

тери в электрическом оборудовании и линиях электрической сети при наличии высших гармоник тока, по сравнению с тем, если бы в оборудовании и сетях протекал синусоидальный ток, не превышает 1,17.

В режиме 2 уровень высших гармоник тока и напряжения (рис. 3) ниже, чем в режиме 1. В частности, третья гармоника потребляемого тока не превышает 3,5% от первой, пятая – менее 3,6%. Начиная с девятой гармоники их уровень не превосходит 1%. Коэффициенты нелинейных искажений по току – 7,3 %, по напряжению – 2,7%. К-фактор равен 1,09.

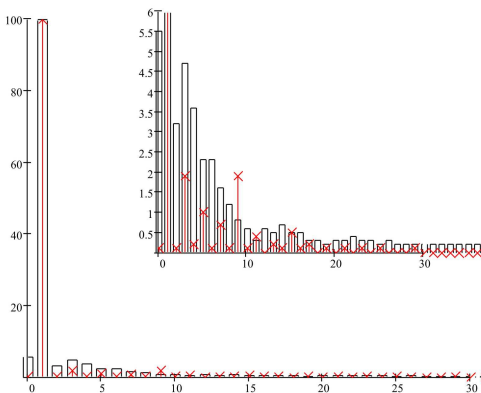


Рис. 3. Гармонический состав потребляемого тока (□) и напряжения (×) при работе ИПЕОТ в режиме 2.

Сравнительный анализ результатов. По результатам испытаний ИПЕОТ на максимальной мощности составим сравнительную таблицу 2 с источниками питания инверторного (ВДИ-L200) и традиционного типов (ВДУ-125), исследованными в работе [4].

Из табл. 2 видно, что наибольшим показателем степени искажения формы напряжения питания (коэффициент нелинейных искажений напряжения, THD_U) обладает инверторный источник питания. Для ИПЕОТ было получено самое низкое значение коэффициента нелинейных искажений тока $THD_I = 7,3\%$, что вдвое ниже аналогичного показателя для лучшего из сравниваемых традиционных источников питания – ВДУ-125. Тенденция снижения уровня высших гармоник сварочного тока и, как результат – потребляемого тока, была определена теоретически в работе [8], что нашло подтверждение в данном

экспериментальном исследовании. По остальным показателям качества потребляемой электроэнергии ИПЕОТ не уступает сравнимым источникам питания.

Таблица 2 - Параметры сети при работе сварочных источников питания.

Параметры	ВДИ-Л200	ВДУ-125	ИПЕОТ
Действующее значение тока I , А	36,8	23,8	15,4
Действующее значение напряжения U , В	221,5	210,6	217,4
Полная мощность S , кВ·А	8,3	5,0	3,4
Активная мощность P , кВт	6,1	3,7	3,35
Реактивная мощность Q , кВ·Ар	5,6	3,4	0,66
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,980	0,764	0,981
Коэффициент нелинейных искажений тока THD_I , %	86,366	16,879	7,3
Коэффициент нелинейных искажений напряжения THD_U , %	5,957	2,256	2,7
K -фактор	7,259	1,309	1,09

Для успешной конкуренции традиционных источников питания с инверторными, в частности, в области их технологических возможностей, нельзя обойти вопрос регулирования сварочного тока. Применение тиристоров для фазового регулирования на протяжении полупериода, как это сделано в источнике питания ВДУ-201, увеличивает уровень высших гармоник.

В отличие от источников питания с тиристорным регулированием сварочного тока, показатели качества потребления электроэнергии при работе ИПЕОТ не ухудшаются при использовании дискретно-частотного фазового регулирования (режим 2), разработанного в ИЭС им. Е.О. Патона [5].

Согласно международному стандарту качества электроэнергии – EN50160 предельное значение коэффициента нелинейных искажений напряжения составляет 5% [1]. ИПЕОТ полностью удовлетворяет этим требованиям и его применение на территории действия этого стандарта является допустимым во всем диапазоне регулирования сварочного тока.

Согласно ГОСТ 13109-97, сравниваемые сварочные источники питания, не превышают предел допустимого искажения синусоидальной формы напряжения сети, равного 8% [2].

В Украине пока отсутствует аналог упомянутых стандартов для потребителей электроэнергии с входным током более 16 А [9], что позволяет обходить вниманием влияние сварочного оборудования на

снижение качества электроэнергии. Однако тенденции к созданию единого энергетического пространства, неминуемо приведет и к объединению стандартов в этой сфере.

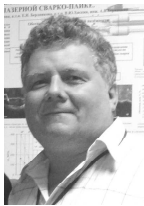
Выводы.

1. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о перспективности дальнейшего развития сварочных источников питания с емкостным ограничением тока наряду с другими традиционными сварочными источниками питания.

2. Дискретно-частотное фазовое регулирование сварочного тока в источниках с емкостным ограничением сварочного тока, позволяет решать многие технологические задачи, свойственные сварочным инверторам.

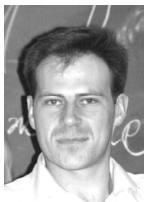
3. При использовании дискретно-частотного фазового регулирования сварочного тока не происходит характерный для тиристорного регулирования, рост уровня высших гармоник тока.

Список литературы: 1. EN 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems: European Committee for Electrotechnical Standardization CENELEC TC 8X, 2006. 2. Межгосударственный стандарт ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск.: Издание официальное, 1999. – 31 с. 3. *Nan Zhi, Ying Pan, Ming Hua* EMC Test Content of Arc Welding Equipment in Accordance with the National Standard GB 15579.10 // *Dian Han Ji = Electric welding machine*. – 2009. – Vol. 39, No. 12. – P. 1-6 (in Chinese). 4. *Рымар С.В., Жерносеков А.М., Сидорец В.Н.* Влияние однофазных источников питания сварочной дуги на электрическую сеть // *Автоматическая сварка*. – 2011. – № 12. – С. 9-15. 5. Пат. 49239. Україна, МПК В23К 9/00, В23К 9/10. Зварювальне джерело змінного струму резонансного типу з дискретно частотним й фазовим регулюванням / *Д.Д. Кункін, О.Є. Коротинський, М.І. Скопюк*. – u2009 10536. Заявлено 19.10.2009. Опубл. 26.04.2010. Бюл. № 8. – 4 с. 6. *Лебедев В.К., Коротинский А.Е.* Дуга переменного тока в цепи с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью // *Автоматическая сварка*. – 1994. – № 12. – С. 47-48. 7. *Коротинский А.Е.* Дискретно-временное регулирование сварочного тока в источниках типа LC // *Автоматическая сварка*. – 2000. – № 6. – С. 44-46. 8. *Сидорец 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. 9. 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.



Сидорец Владимир Николаевич, доктор технических наук. Защитил диссертации кандидата и доктора технических наук в Институте электродинамики НАН Украины по специальности "Теоретическая электротехника", соответственно в 1992 и 2009 гг. Ведущий научный сотрудник отдела "Физика газового разряда и техника плазмы" Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины с 2009 г.

Научные интересы связаны с проблемами моделирования нелинейных цепей с электрической дугой, взаимодействия лазерного излучения с металлами, детерминированного хаоса и странных аттракторов.



Кункин Дмитрий Дмитриевич, защитил диплом магистра электроники в Национальном техническом университете Украины "КПИ" по специальности "Электронные системы и устройства" в 2003 г. Младший научный сотрудник отдела "Автоматического регулирования процесса сварки и нанесения покрытий" Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины с 2011 г.

Научные интересы связаны с совершенствованием традиционных источников питания для сварки в направлении улучшения их массогабаритных показателей и технологических возможностей



Рымар Сергей Владимирович, доктор технических наук. Защитил диссертации кандидата и доктора технических наук в Институте электродинамики НАН Украины по специальности "Электрические машины и аппараты", соответственно в 1999 и 2010 гг. Ведущий научный сотрудник отдела "Электротермия" Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины с 2010 г.

Научные интересы связаны с проблемами разработки сварочных источников питания, теорией оптимизационного расчета и проектирования специальных трансформаторов и реакторов, улучшения качества электроэнергии, энергосбережения в энергетике, рекуперации тепловой энергии, индукционного нагрева.



Жерносеков Анатолий Максимович, кандидат технических наук. Защитил диссертацию в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины по специальности "Автоматизация технологических процессов" в 2006г. Старший научный сотрудник отдела "Источники питания" Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины с 2007 г.

Научные интересы связаны с проблемами разработки сварочных источников питания и технологий для дуговой сварки, а также с созданием оборудования для импульсно-дуговых процессов.

*Поступила в редколлегию 21.03.2012
Рецензент д.т.н., проф. Лушков В.С.*