

УДК 621.314

## ВЛИЯНИЕ ИНВЕРТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**О. Г. ШИРОКОВ, Г. О. ШИРОКОВ, А. А. АЛФЕРОВ,  
О. А. АЛФЕРОВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Сварка плавлением, в особенности электродуговая сварка, является основным технологическим процессом сварочного производства. На многих предприятиях широко применяются установки дуговой и контактной сварки с инверторными и выпрямительными источниками питания. Сварочные выпрямители питаются в основном от сетей 0,38 кВ. Мощность сварочных машин автоматической сварки однофазным током промышленной частоты достигает 1,5 МВ·А, сварки трехфазной дугой – нескольких МВ·А. В некоторых цехах машиностроительных предприятий удельный вес сварочных машин в нагрузке может достигать 80 % [1].

С начала 80-х гг. вместе с началом использования силовых транзисторов ученые стали замечать, что сварочные выпрямители оказывают негативное влияние на работу другого электрооборудования.

По своему воздействию на несинусоидальность питающей сети сварочные нагрузки можно разделить на две категории: установки дуговой и контактной электро-сварки переменного тока, установки дуговой электросварки постоянного тока. Установки дуговой электросварки переменного тока воздействуют на питающую сеть аналогично дуговым сталеплавильным печам. Включение сварочных машин контактной электросварки производится с помощью игнитронных или тиристорных ключей, которые для плавного регулирования сварочного тока снабжаются системами фазового регулирования угла зажигания, что приводит к искажению тока высшими гармониками, уровень которых аналогичен уровню гармоник для дуговой сварки переменного тока.

Определение токов гармоник, генерируемых установками дуговой электросварки постоянного тока, аналогично определению токов гармоник для вентилятных преобразователей. Токи гармоник (рекомендуется учитывать только 5, 7, 11, 13-ю гармоники) единичной установки дуговой электросварки постоянного тока определяются по формуле

$$I_v = \frac{I_{св}}{\nu},$$

где  $I_{св}$  – номинальный первичный ток установки.

Для группы установок электросварки независимо от режима работы суммарные отдельные токи гармоник определяются по формуле

$$I_{\text{вр}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{vi}^2}$$

где  $I_{vi}$  – ток  $v$ -й гармоники  $i$ -й установки;  $n$  – общее число работающих установок [2].

Цель работы – определение степени влияния инверторных источников питания сварочной дуги на систему электроснабжения промышленных предприятий; получение спектра высших гармоник, генерируемых однофазными и трехфазными источниками питания сварочной дуги, и оценка их вклада в ухудшение показателей качества электроэнергии.

### Основная часть

В последнее десятилетие все промышленно развитые страны стали уделять особое внимание энергосберегающим технологиям и качеству электроэнергии электрических сетей. Вызвано это тем, что в начале 90-х гг. 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.

Поскольку в нашей стране отсутствует нормативно-техническая база, нормирующая величину гармоник тока, то для определения степени искажения нелинейности данных величин используется коэффициент (гармоник)  $THDi$  (Total Harmonic Current Distortion), применяемый за рубежом.

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  $THDi$  до 90–140 %, особенно за счет генерации в сеть 3-й и кратных ей гармоник тока до 80 % (токи нулевой последовательности). Высшие гармоники тока увеличивают коэффициент нелинейных искажений напряжения  $K_U$  сетей, доводя его до 7 % и выше.

Приемлемые значения коэффициента  $K_U$  ограничены 3 % для индивидуальных нелинейных нагрузок. Допустимое значение определено 5 % для совокупных нагрузок сети. Отечественные нормативные документы допускают значение  $K_U$  до 8 %, при котором уже существенно искажается синусоидальное напряжение сети.

Значение коэффициента нелинейных искажений тока  $THDi$  при работе однофазных сварочных источников питания лежит в диапазоне 8,7–121,5 %, а напряжения  $K_U$  – 2,2–6,7 %, что свидетельствует о плохой электромагнитной совместимости большинства однофазных сварочных источников питания. Особенно опасна генерация 3-й и кратных ей гармоник тока.

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.

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 необхо-

димо развивать и совершенствовать, например, используя конденсаторные умножители напряжения, устройства стабилизации горения сварочной дуги или индуктивно-емкостную цепь.

Однофазные сварочные источники питания, в которых применяется электрическая дуга, являющаяся нелинейной нагрузкой, сварочные выпрямители и инверторы также являются генераторами высших гармоник (ВГ) 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 [3].

Проблема высших гармоник, генерируемых сварочным оборудованием, весьма актуальна, так как на предприятиях Гомельской области присутствуют цеха с долей сварочной нагрузки более 50 %, которые могут вносить существенный вклад в искажение кривой напряжения и тока, а также на электромагнитную совместимость в целом.

*Степень искажения напряжения различными источниками питания сварочной дуги.* В промышленности широкое применение находят сварочные установки, в которых в качестве источника питания используются полупроводниковые выпрямители. Сварочные выпрямители коммутируются по трехфазной мостовой схеме с использованием неуправляемых вентилей либо управляемых – тиристоров.

В расчетах сварочная дуга учитывается в виде постоянной противо-ЭДС. Токи ВГ, генерируемые сварочными выпрямителями, различны для отдельных режимов работы сварочных установок. В зависимости от нагрузки сварочный выпрямитель, собранный по трехфазной мостовой схеме, может работать в одном из трех режимов коммутации:

- режиме прерывистых токов при малых нагрузках, которому соответствует двухвентильная коммутация;
- режиме смешанной двух- и трехвентильной коммутации при средних нагрузках;
- режиме трехвентильной коммутации при больших нагрузках.

В кривых тока сварочных выпрямителей уровни 5-й и 7-й гармоник тока являются нестабильными; незначительные изменения условий горения дуги могут вести к увеличению или уменьшению тока 5-й и 7-й гармоник в несколько раз. Также в полигармоническом сигнале имеются ВГ четных порядков и кратные трем; основной причиной их появления является разброс углов зажигания групп вентилей, который обусловлен разбросом и нестабильностью характеристик отдельных вентилей. Сказывается также возникающее при этом подмагничивание магнитопровода трансформатора постоянным магнитным потоком [1].

Сварочные аппараты производят непрерывные по спектру частот составляющие, для каждого режима свои. Длительность каждого процесса варьируется от одной до нескольких секунд в зависимости от типа сварочного аппарата [5]. Колебания и спектр гармоник в типичном процессе работы дуговой сварки, измеренные на вторичной обмотке трансформатора, приведены на рис. 1.

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.

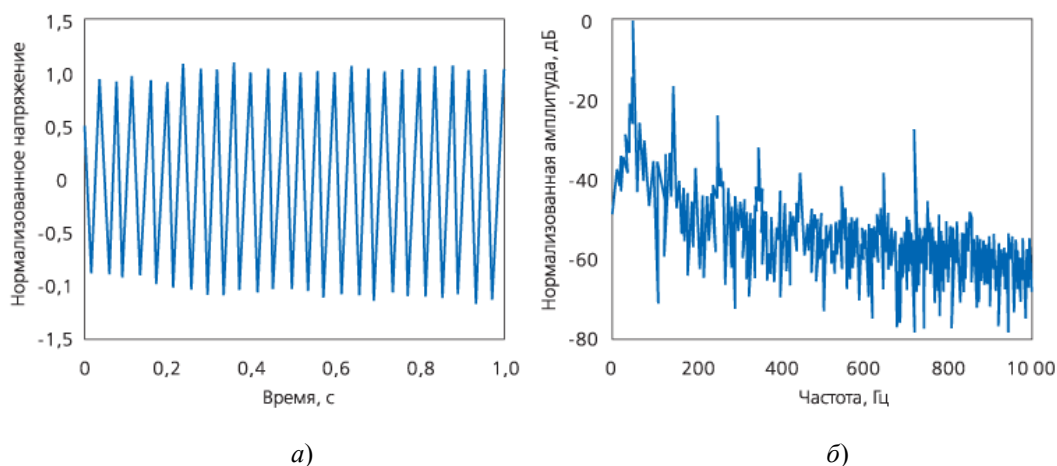


Рис. 1. Колебания и спектр гармоник в типичном процессе работы дуговой сварки, измеренные на вторичном контуре трансформатора:

*a* – колебания напряжения; *б* – спектр с гармониками (пики) и интергармониками (Power system quality assessment, Wiley, 2000)

Инверторные источники питания сварочной дуги 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, ненадежными 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.

В [3] было проведено исследование следующих сварочных источников питания, питающихся от однофазной сети переменного тока частотой 50 Гц:

- инверторный источник питания ВДИ-L-200, предназначенный для ручной дуговой сварки низкоуглеродистых сталей, различных цветных металлов любыми видами электродов;

- сварочный трансформатор с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния и магнитным шунтом СТШ-250 для ручной дуговой сварки штучными электродами переменного и постоянного тока;

- сварочный источник питания с конденсаторным множителем напряжения ВДУ-125-У3.

Для инверторного источника питания ВДИ-L-200 в питающей сети 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 гармоники напряжения, превосходящие 1 %: 3-я – 5,2 %; 5-я – 2,2 %; 7-я – 1,4 %. Коэффициенты нелинейных искажений тока и напряжения данного источника питания равны:  $THDi = 86,4 \%$ ;  $K_U = 5,9 \%$ .

Для однофазного сварочного трансформатора СТШ-250 со стабилизатором горения сварочной дуги в питающей сети 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 данного источника питания равны:  $THDi = 15,9 \%$ ;  $K_U = 3,1 \%$ .

Для однофазного сварочного источника питания с конденсаторным умножителем напряжения ВДУ-125-У3 в питающей сети выражены 3-я гармоника тока, составляющая 15,6 % от 1-й гармоники, и 5-я – 4,6 %; остальные нечетные гармоники тока не превосходят 1 %. Нечетные номера гармоник напряжения, превосходящие 1 %, имеют значения: 3-я – 1,6 %; 5-я – 1,1 %. Коэффициенты нелинейных искажений тока и напряжения данного источника питания равны:  $THDi = 16,9 \%$ ;  $K_U = 2,2 \%$ .

Несмотря на все свои преимущества (малую массу, обеспечение заданной формы вольт-амперной 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. Это свидетельствует об их плохой электромагнитной совместимости с системой электроснабжения.

Отрицательным влиянием однофазных сварочных источников питания для сетей в отличие от трехфазных источников является то, что они значительно загружают нулевой провод, не предназначенный для больших нагрузок, высшими гармониками тока нулевой последовательности.

Получение экспериментальных данных по показателям качества электрической энергии для сварочного оборудования проводилось при помощи устройства контроля параметров качества электрической энергии УК1 (ТУ РБ 100230547.012–2002). Устройство устанавливается на энергообъектах и осуществляет сбор, обработку и хранение информации о параметрах качества электрической энергии в соответствии с требованиями ГОСТ 13109–97 [4].

Для получения экспериментальных данных были выбраны различные по принципу работы и мощности сварочные трансформаторы. Эксперименты проводились для различных режимов работы трансформаторов:

- режим холостого хода;
- режим короткого замыкания.

Перед испытанием каждого сварочного трансформатора проводились замеры питающей сети с отключенной вилкой трансформатора.

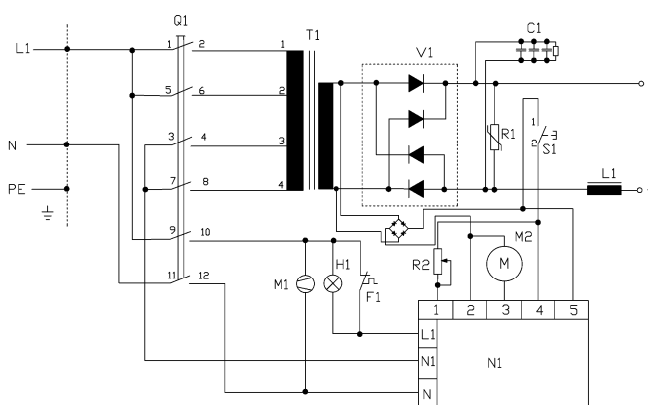
### Определение показателей качества электрической энергии при работе сварочного трансформатора S-MIG-160

Измерения проводились при сварке порошковой проволокой без защитного газа.

Внешний вид сварочного трансформатора S-MIG-160 и схема его работы приведены на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Сварочный трансформатор S-MIG-160:  
а – внешний вид; б – схема работы

Спектрограммы  $n$ -х гармонических составляющих напряжения для сварочного трансформатора S-MIG-160, снятые для питающей сети, режима холостого хода и режима короткого замыкания, приведены на рис. 3.

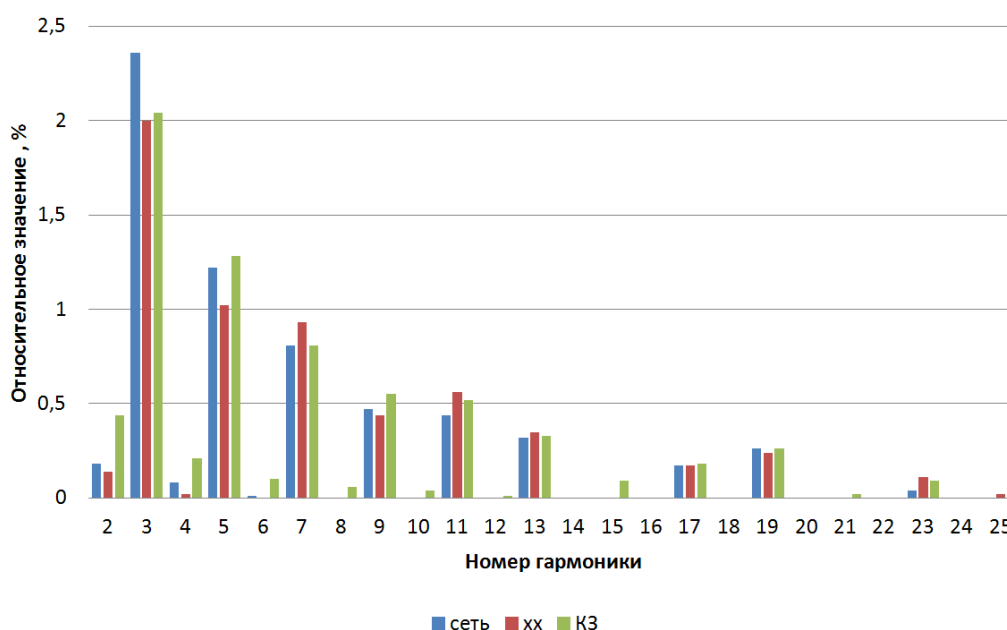


Рис. 3. Сводный спектр высших гармоник напряжения по всем трем снятым режимам

Из анализа рис. 3 можно сделать вывод, что коэффициенты  $n$ -х гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$  за время измерения не превышали пределы нормально допустимых значений; в режиме холостого хода возрастают 7, 11, 13, 23 и 25-я гармонические составляющие, а в режиме короткого замыкания – 2–6-я; 8–10-я и 15-я.

Кратковременная доза фликера  $P_{St}$  за время измерения выходила за пределы допустимых значений. При этом наибольшее значение кратковременной дозы фликера  $P_{St}$  для фазы  $A$  составляло 7,74 о. е. (при верхнем пределе 1,38 о. е.).

Коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  по фазе  $A$  за время измерения не превышали нормально и предельно допустимые значения. При этом наибольшее значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  по фазе  $A$  за время измерения составляло 4,32 % (при нормально и предельно допустимых значениях для номинального напряжения 0,38 кВ, равных 8 и 12 %).

Длительности провалов напряжения  $\Delta t_n$  за время измерения превышали значения, установленные ГОСТ 13109–97. При этом в фазе  $A$  за время измерения зарегистрировано 23 провала напряжения длительностью более 100 мс. Длительность провалов напряжения за время измерения находилась в диапазоне от 10 до 320 мс.

### Определение показателей качества электрической энергии при работе сварочного трансформатора АС 150 INVERTER

АС 150 INVERTER – это сварочный инверторный аппарат, разработанный для ручной электродуговой сварки постоянным током покрытыми плавящимися электродами. Внешний вид сварочного трансформатора АС 150 INVERTER приведен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид сварочного трансформатора AC 150 INVERTER

Спектрограммы  $n$ -х гармонических составляющих напряжения для сварочного трансформатора AC 150 INVERTER, снятые для питающей сети, режима холостого хода и режима короткого замыкания, приведены на рис. 5.

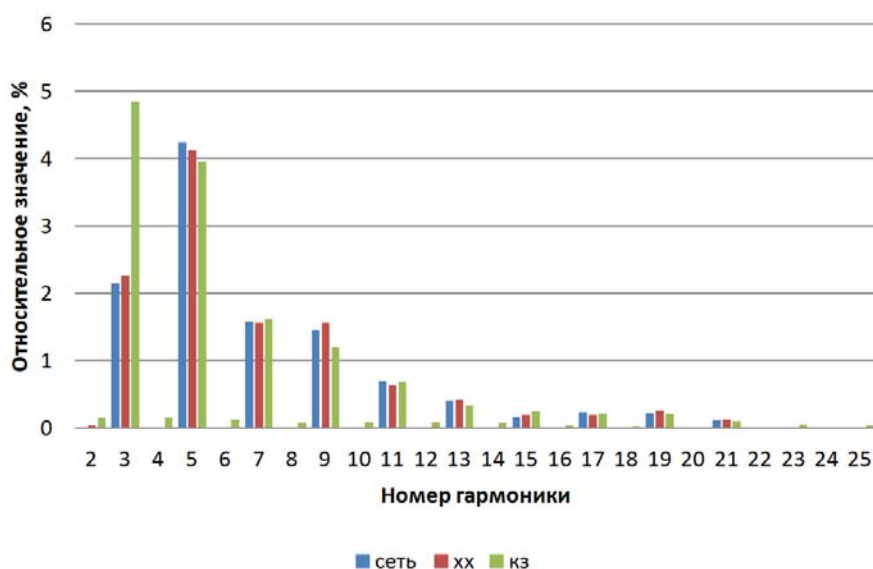


Рис. 5. Сводный спектр высших гармоник напряжения по всем трем снятым режимам

Из анализа рис. 5 следует, что коэффициенты  $n$ -х гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$  за время измерения не превышали пределы нормально допустимых значений. Особенно выделялись в общем спектре гармоник коэффициенты 3, 5, 7, 9, 11 и 13-й гармонических составляющих. При работе сварочного трансформатора AC 150 на холостом ходу коэффициенты  $K_{U(n)}$  практически не изменяются по сравнению с питающей сетью, а в режиме короткого замыкания сильно возрастает коэффициент 3-й гармонической составляющей напряжения.

Кратковременная доза фликера  $P_{St}$  за время измерений выходила за пределы предельно допустимых значений (верхний предел – 1,38 о. е.). При этом наибольшее значение кратковременной дозы фликера  $P_{St}$  для фазы  $A$  составляло 2,51 о. е; среднее значение – 1,32 о. е.

Коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  по фазе  $A$  за время измерения кратковременно превышали нормально допустимые значения. При этом наибольшее значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  по фазе  $A$  за время измерения составляло 8,48 %, а среднее – 6,7 %

(при нормально и предельно допустимых значениях для номинального напряжения 0,38 кВ, равных 8 и 12 %).

**Определение показателей качества электрической энергии при работе сварочного трансформатора ВД-301У3**

Выпрямитель сварочный типа ВД-301У3 предназначен для питания электрической сварочной дуги постоянным током при ручной дуговой сварке, резке или наплавке металлов электродами постоянного тока.

Внешний вид сварочного трансформатора ВД-301У3 и схема его внутренних соединений приведены на рис. 6.

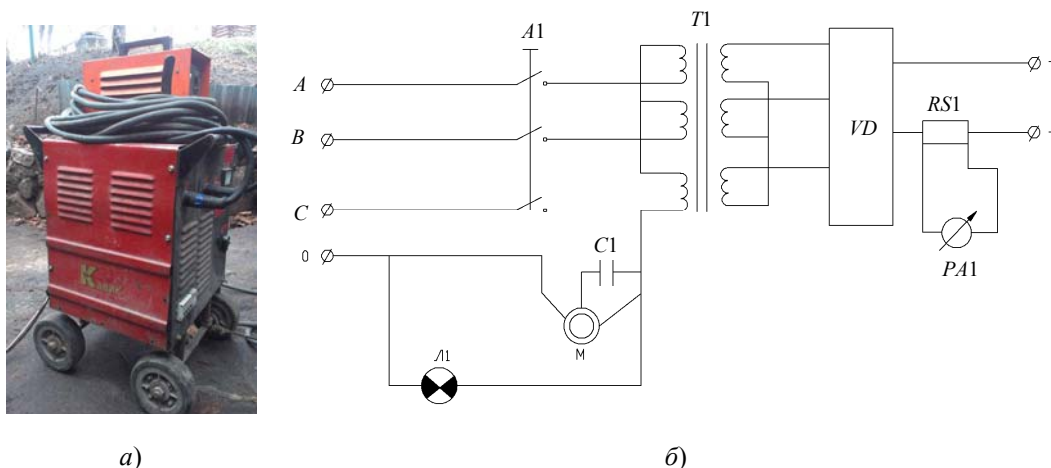


Рис. 6. Сварочный трансформатор ВД-301У3:  
а – внешний вид; б – принципиальная схема

Спектрограммы *n*-х гармонических составляющих напряжения для сварочного трансформатора ВД-301У3 для режима короткого замыкания приведены на рис. 7.

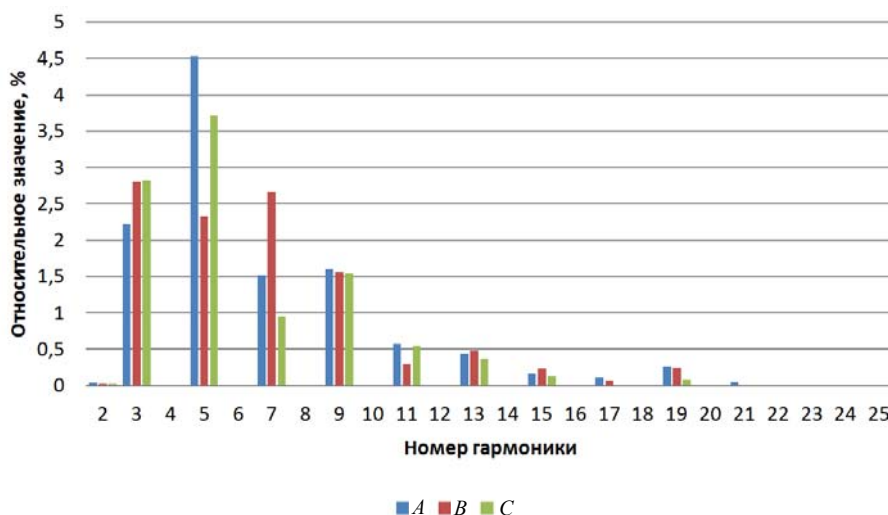


Рис. 7. Спектр высших гармоник напряжения при работе сварочного трансформатора в режиме короткого замыкания по фазам А, В и С

Из анализа рис. 7 следует, что в режиме короткого замыкания возрастает и проявляется по всем фазам коэффициент 9-й гармонической составляющей напряжения, который выходит за пределы нормально допустимых значений и равен для фазы А – 1,6 %; В – 1,56 %; С – 1,54 % при норме 1,5 %.



Коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  по фазам  $A$ ,  $B$  и  $C$  за время измерения не превышали нормально и предельно допустимые значения. При этом наибольшее значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  по фазе  $A$  за время измерения составляло 5,98 %, среднее – 5,57; по фазе  $B$  – 5,07 %; среднее – 4,83 %; по фазе  $C$  – 5,57 %; среднее – 5,06 % (при нормально и предельно допустимых значениях для номинального напряжения 0,38 кВ, равных 8 и 12 %).

Установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$  за время измерения превышало нормально допустимые значения для выводов приемников электрической энергии по фазе  $C$  ( $\pm 5$  % от номинального напряжения электрической сети). При этом наибольшее значение установившегося отклонения напряжения по фазе  $C$  за время измерения составило 5,63 %, а наименьшее значение установившегося отклонения напряжения за время измерения составило 0,94 %.

### Заключение

Из анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что однофазные сварочные аппараты S-MIG-160, AC 150 генерируют в сеть нечетные гармоники от 3 до 25 включительно. Трехфазный сварочный аппарат ВД-301У3 генерирует от 3 до 21 гармоники по всем трем фазам, особенно выделяется 9-я гармоника, которая превышает нормально допустимое значение по всем трем фазам. Эксперименты проводились на отдельных сварочных аппаратах, поэтому искажения, вносимые ими в сеть, незначительны. Если рассматривать сварочный цех, в котором работают одновременно несколько сварочных аппаратов, то искажения показателей качества электрической энергии будут более существенными, в этом случае целесообразно рассмотреть вариант установки фильтров нечетных гармоник в диапазоне от 3 до 13, чтобы предотвратить их негативное влияние на другое оборудование промышленного предприятия.

### Литература

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
2. Источники гармонических составляющих. – 2012. – Режим доступа: <http://esis-keu.ru/ems/360-ems>. – Дата доступа: 10.10.2014.
3. Электромагнитная совместимость источников питания сварочной дуги / Д. М. Пентегов [и др.] // Электротехника и электромеханика. – 2012. – № 3. – С. 34–40.
4. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – Взамен ГОСТ 13109–87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – М. : Изд-во стандартов, 1988.
5. Ханзелка, Зб. Интергармоники (Interharmonics) / Збигнев Ханзелка, Анжей Бьень. – 2005. – Режим доступа: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=3107](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3107). – Дата доступа: 11.10.2014.

Получено 24.02.2015 г.