

УДК 621.791

Поднебенная С. К., Бурлака В. В., Гулаков С. В.

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ПОМЕХ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СВАРОЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА С ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

Сварочные источники питания могут быть источниками помех, генерируемых в питающую сеть [1]. Во многих государствах качество электроэнергии строго нормируется, а его ухудшение всячески пресекается, в том числе и с применением штрафных санкций. Таким образом, задача повышения показателей сварочного производства включает в себя также и задачу снижения уровня помех, генерируемых сварочными источниками питания (ИП).

В сварочных источниках питания основными источниками нелинейных искажений потребляемого тока являются [2]: тиристорное регулирование на стороне переменного тока; насыщение магнитопровода трансформатора(-ов); наличие выпрямителя (диодного или тиристорного); флуктуации дугового процесса.

Так, на рис. 1 приведены осциллограммы сетевого тока, потребляемого сварочным источником ТДЭ-250, нагруженным на балластный реостат. Осциллографирование производилось с помощью цифрового осциллографа АСК-2034 и токовых клещей SANWA CL-22AD.

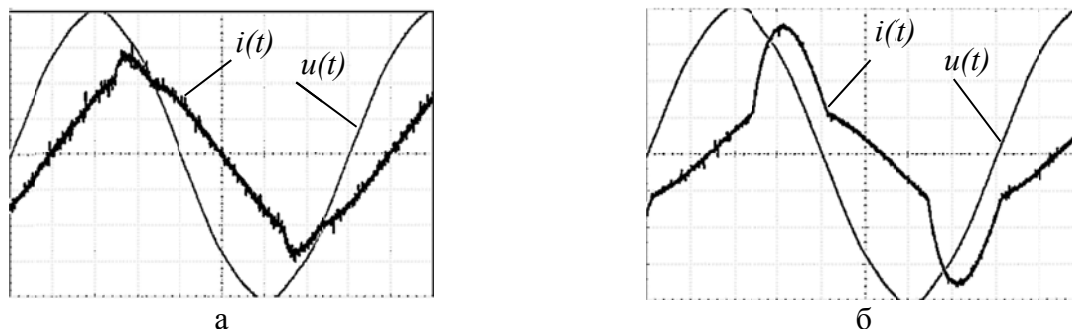


Рис. 1. Осциллограммы токов и напряжений при работе сварочного трансформатора ТДЭ-250:

а – напряжение 33 В, ток 50 А, угол управления тиристорами 120° ; б – напряжение 25 В, ток 150 А, угол управления тиристорами 120°

На рис. 2 приведена осциллограмма сетевого тока сварочного источника ВДГ-302, который имеет в своем составе трехфазный мостовой диодный выпрямитель. В токе имеются гармоники с номерами $6n \pm 1$, где n – целое число.

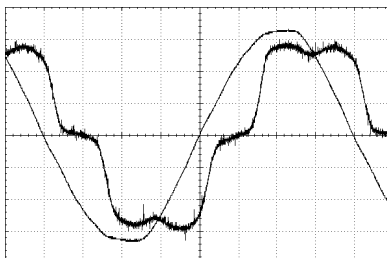


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжений при работе сварочного источника ВДГ-302, нагруженного на балластный реостат, $I_{rms} = 10,5 A$, $m_I = 5 A / дел$, $m_U = 100 B / дел$

Приведение параметров качества электроэнергии к параметрам, оговоренным в стандартах практически невозможно при использовании пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. Так, однофазный источник ТДЭ-250 включается на линейное напряжение сети,

чем создает несимметричный режим. Более того, из-за нестационарного характера нагрузки источников (сварочная дуга) спектр потребляемого тока также непостоянен. В этих условиях значительно снизить влияние сварочных источников на питающую сеть за счет снижения коэффициента несинусоидальных искажений, устранения несимметрии и компенсации реактивной мощности можно путем установки параллельного активного фильтра (АФ).

Классический параллельный АФ представляет собой инвертор с токовым выходом, подключаемый параллельно нагрузке. АФ обычно строится на основе трехфазного инвертора напряжения (ИН) или тока, подключенного к сети через интерфейсный фильтр (ИФ). Зачастую ИФ выполнен в виде одиночного дросселя (фильтр первого порядка), что позволяет получить наилучшие динамические свойства АФ, но требует повышенной частоты переключения инвертора.

В работе [1] для повышения качества электроэнергии предложен модифицированный АФ с повышенной скоростью изменения выходного тока. Это достигается за счет подключения к выходу основного инвертора АФ корректирующего звена, работающего в режиме линейного генератора тока [3], при этом алгоритм управления построен так, что потери активной мощности в корректирующем звене не превышают порядка 5 % мощности нагрузки.

Целью работы является повышение эффективности работы параллельного активного фильтра за счет снижения частоты переключения ключей инвертора, изменения схемотехники и учета передаточной функции ИФ, а также применения дополнительного корректирующего звена.

Авторами предлагается в качестве ИФ использовать LCL-фильтр третьего порядка, что позволит снизить частоту переключения ключей ИН при сохранении хороших динамических характеристик [4]. Это улучшает энергетические характеристики параллельного АФ. Схема подключения параллельного АФ с ИФ третьего порядка приведена на рис. 3.

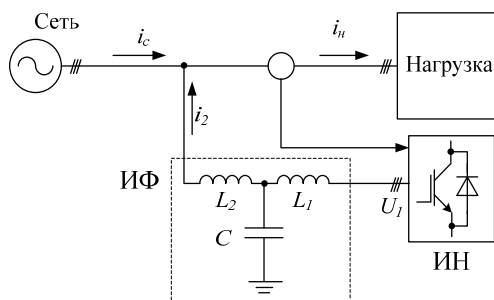


Рис. 3. Схема подключения параллельного АФ с ИФ третьего порядка

Повышение эффективности параллельного АФ заключается в формировании сигналов управления ИН с учетом запаздывания в ИФ.

Определим передаточную функцию ИФ как отношение инжектируемого тока $I_2(s)$ к выходному напряжению инвертора АФ $U_1(s)$, приняв допущение, что импеданс сети равен нулю:

$$H(s) = \frac{I_2(s)}{U_1(s)}. \quad (1)$$

Ток $I_{зад}(j\omega)$, инжектируемый в точке подключения АФ, рассчитывается из условия, что АФ и нагрузка должны представлять по отношению к сети симметричную активную нагрузку с сопротивлением R в каждой фазе. Это имитируемое сопротивление устанавливается из условия баланса мощности:

$$R = \frac{U_{Arms}^2 + U_{Brms}^2 + U_{Crms}^2}{P}, \quad (2)$$

где U_{Arms} , U_{Brms} , U_{Crms} – среднеквадратичные фазные напряжения сети;
 P – сумма активной мощности нагрузки и мощности потерь в АФ.

Спектр инжектируемого АФ тока $I_{зад}(j\omega)$ рассчитывается путем вычитания из спектра напряжения сети, разделенного на R , спектра тока нагрузки. После этого спектр напряжения на выходе ИН АФ определится как:

$$U_1(j\omega) = I_{зад}(j\omega)/H(j\omega) + U_c(j\omega) \cdot A(j\omega), \quad (3)$$

где $U_c(j\omega)$ – спектр напряжения сети;

$A(s) = L_1 \cdot C \cdot s^2 + 1$ – коэффициент передачи ИФ по напряжению.

Это позволяет учесть частотную характеристику ИФ. Опорное напряжение ШИМ сигналов управления инвертором формируем как обратное преобразование Фурье от $U_1(j\omega)$.

Передаточная функция ИФ третьего порядка (LCL-фильтр, рис. 4) имеет вид:

$$H(s) = \frac{C \cdot s}{(1 + L_1 \cdot s^2 \cdot C) \cdot (1 + L_2 \cdot s^2 \cdot C) - 1}, \quad (4)$$

где L_1, L_2 – индуктивности ИФ, Гн;

C – емкость ИФ, Ф.

Эффективность разработанной системы управления АФ с учетом передаточной функции ИФ была оценена путем математического моделирования в среде MathCAD.

В качестве исходных данных для модели были взяты токи, потребляемые реальными сварочными источниками ТДЭ-250 и ВДГ-302, нагруженными на балластные реостаты (рис. 1, б; рис. 2). Видно, что эти токи носят несинусоидальный характер. Коэффициент нелинейных искажений (КНИ) первичного тока сварочного трансформатора ТДЭ-250 составляет 32,6 %, КНИ потребляемого тока сварочного источника ВДГ-302 составляет 19,2 %.

Согласно современным стандартам качества электроэнергии, КНИ тока нормируется до 40-й гармоники, поэтому при обработке реальных осциллограмм была произведена передискретизация до 128 точек на период, что определяет частотный диапазон АФ до 64-й гармоники.

Параметры модели АФ: несущая частота ШИМ 10 кГц, $L_1 = 3$ мГн, $L_2 = 100$ мкГн, $C = 47$ мкФ [5], напряжение звена постоянного тока ± 400 В. Принятые допущения: среднеквадратичное фазное напряжение сети 220 В, в спектре напряжения имеется только первая гармоника, фазовый сдвиг между током и напряжением равен 30° , полное сопротивление сети равно нулю.

На рис. 4 приведены полученные кривые токов с учетом и без учета ПФ ИФ.

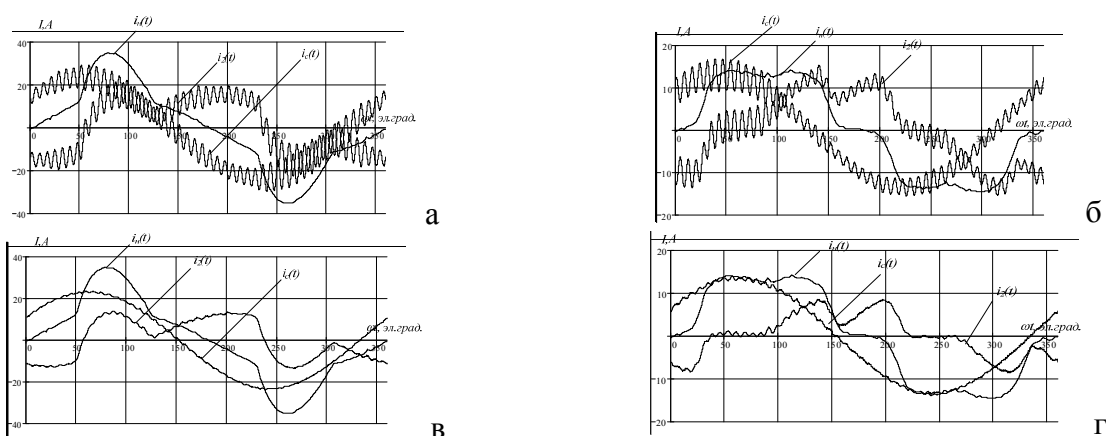


Рис. 4. Диаграммы токов:

- а – без учета ПФ ИФ, источник ВГ – сварочный трансформатор ТДЭ-250, КНИ = 1,2 %;
- б – без учета ПФ ИФ, источник ВГ – сварочный ИП ВДГ-302, КНИ = 3,6 %;
- в – с учетом ПФ ИФ, источник ВГ – сварочный трансформатор ТДЭ-250, КНИ = 0,5 %;
- г – с учетом ПФ ИФ, источник ВГ – сварочный ИП ВДГ-302, КНИ = 1,4 %

Без учета передаточной функции ИФ помимо повышения КНИ появляется дополнительный сдвиг фаз между сетевым напряжением и током, что требует дополнительной компенсации реактивной мощности.

Результаты моделирования показали, что учет передаточной функции ИФ приводит к снижению остаточного КНИ сетевого тока в несколько раз при применении ИФ третьего порядка.

Для дальнейшего уменьшения ошибки регулирования выходного тока предлагается ввести в АФ корректирующее звено, работающее в режиме источника ЭДС, включенного последовательно в ветвь, содержащую конденсатор C . Упрощенная схема подключения приведена на рис. 5.

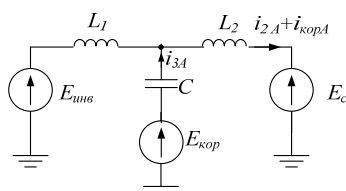


Рис. 5. Упрощенная схема подключения корректирующего звена как источника ЭДС последовательно с емкостью (показано для фазы А)

Для вычисления ЭДС корректирующего звена определяется величина ошибки регулирования инвертора $I_{кор}(s)$ (рис. 6):

$$I_{кор}(s) = I_{зад}(s) - I_2(s), \tag{5}$$

где $I_2(s)$ – выходной ток АФ;

$I_{зад}(s)$ – опорный ток задания АФ.

Величина ЭДС корректирующего звена определяется с использованием коэффициента передачи $Y(s)$ и требуемого тока коррекции $I_{кор}(s)$:

$$E_{кор}(s) = \frac{I_{кор}(s)}{Y(s)}. \tag{6}$$

Коэффициент передачи при подключении последовательно в ветвь с емкостью C определяется как:

$$Y(s) = \frac{L_1 \cdot C \cdot s}{L_1 \cdot L_2 \cdot C \cdot s^2 + L_1 + L_2}, \tag{7}$$

где L_1, L_2 – индуктивности ИФ, Гн;

C – емкость ИФ, Ф.

Полная мощность корректирующего звена S_K при остаточном КНИ сетевого тока, близком к нулю, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Энергетика корректирующего звена

Сварочный источник питания	Мощность нагрузки (на фазу) S_n , ВА	S_K , ВА (на фазу)
ТДЭ-250	4166	43,4
ВДГ-302	2323	53,4

Видно, что мощность корректирующего звена не превышает 2,5 % мощности нагрузки, что положительно сказывается на потерях мощности в АФ.

На рис. 6 приведена структурная схема системы управления АФ с корректирующим звеном, реализующая описанные алгоритмы управления.

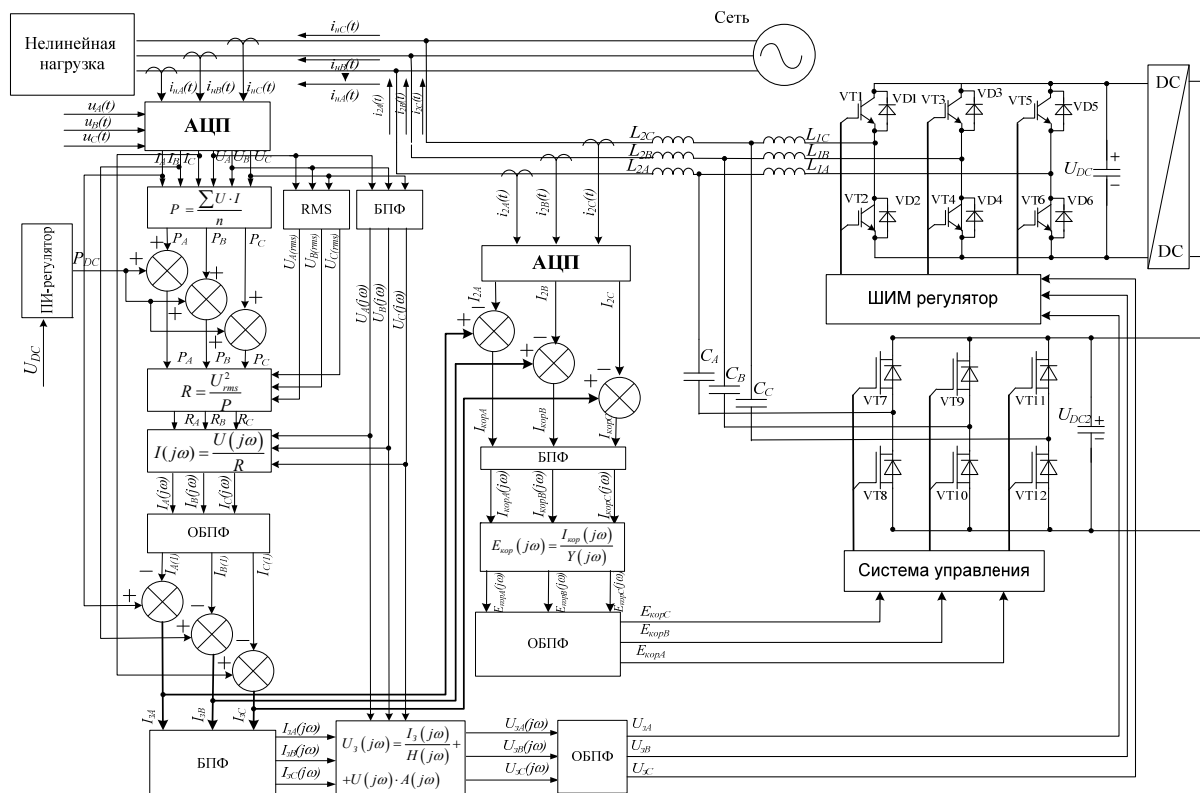


Рис. 6. Система управления параллельного АФ с корректирующим звеном

Главным преимуществом включения корректирующего звена последовательно с конденсатором ИФ является сниженные требования к его выходному напряжению, что позволяет выполнить это звено с применением MOSFET транзисторов, обладающих лучшими динамическими свойствами по сравнению с IGBT.

ВЫВОДЫ

Модификация системы управления и введение дополнительного корректирующего звена в виде управляемого источника ЭДС приводит к снижению уровня пульсаций и остаточного коэффициента гармоник.

Применение АФ, выполненного по предложенной схеме, позволяет обеспечить улучшение качества подавления высших гармоник и снижение генерируемых фильтром помех на частоте ШИМ, что способствует повышению качества питающей сети и улучшает технико-экономические показатели сварочного производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снижение уровня помех, генерируемых сварочными источниками питания / С. В. Гулаков, В. В. Бурлака, С. К. Бублик, М. Д. Дьяченко // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 2 (19). – С. 91–95.
2. Голошубов В. І. Зварювальні джерела живлення : навч. посіб. / В. І. Голошубов. – К. : Арістей, 2005. – 448 с.
3. Патент 93579, МПК Н03Н 11/04. Пристрій корекції якості електроенергії / Бурлака В. В., Гулаков С. В., Бублик С. К., Дьяченко М. Д. ; замовник і патентовласник Приазовський державний технічний університет (UA). – № a200904194 ; заявл. 28.04.2009 ; получ. 25.02.2011, Бюл. № 4.
4. Бурлака В. В. Исследование влияния порядка интерфейсного фильтра на работу параллельного активного фильтра / В. В. Бурлака, С. К. Поднебенная // Университетская наука – 2012 : Международная научно-техническая конференция, 24–26 апреля 2012 г., Мариуполь. – Мариуполь : ПТУ, 2012. – Т. 2. – С. 83–84
5. LCL Interface Filter Design for Shunt Active Power Filters / A. Bitoleanu, M. Popescu, D. Marin, M. Dobriceanu // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2010. – V. 10, Number 3. – P. 55–60.