

УДК 621.314: 621.311.6

**П. С. Сафронов, к. т. н., доц.; Д. В. Кучеренко; Ю. В. Бондаренко, к. т. н.;
А. Ф. Бондаренко, к. т. н., доц.; В. Н. Сидорец, д. т. н., проф.**

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОФАЗНЫМ КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

С целью улучшения электромагнитной совместимости источников питания с сетью предложено использовать схемную топологию с многофазным корректором коэффициента мощности. Способ реализации многофазного корректора коэффициента мощности предусматривает работу каждой унифицированной фазы в режиме прерывистого тока, близкого к граничному, а сигнал управления корректором формируется с учетом спектрального состава входного тока, что позволяет получить входной ток, близкий к синусоидальному. С помощью имитационного моделирования выполнена оценка коэффициента гармонических искажений исследуемой схемы и подтверждена эффективность предложенных решений.

***Ключевые слова:** источник питания, многофазный корректор коэффициента мощности, сигнал управления, коэффициент гармонических искажений.*

Введение. В современных условиях постоянного роста количества используемых электронных приборов, устройств и систем бытового и промышленного назначения, представляющих собой нелинейные нагрузки для сети питания, актуальным направлением исследований и разработок остается улучшение электромагнитной совместимости потребителей с сетью. Отдельно в этом контексте следует отметить источники питания для электротехнологических установок, таких как установки контактной сварки, которые в процессе работы потребляют из сети резко несинусоидальный ток, что приводит к «загрязнению» сети и увеличению энергетических потерь [1].

Эффективным способом улучшения электромагнитной совместимости источника питания с сетью (наряду с пассивной и активной фильтрацией) является коррекция коэффициента мощности [2]. Этот способ заключается во введении в схему источника питания (во входную ее часть) специальной цепи коррекции, обеспечивающей потребление источником питания тока, форма которого приближена к синусоидальной.

Перспективным подходом к созданию корректоров коэффициента мощности считается их построение в соответствии с многофазным принципом [3, 4]. Эта тема является новой для отечественного научного пространства. Публикации, посвященные исследованию многофазных корректоров коэффициента мощности (Multiphase Interleaved Power Factor Corrector), появляются в основном в зарубежных изданиях. Суть подхода заключается в использовании нескольких унифицированных цепей коррекции, соединенных параллельно и работающих со сдвигом по фазе. Преимуществами построения корректоров коэффициента мощности в соответствии с многофазным принципом является повышенная энергоэффективность, сниженные пульсации входного и выходного токов и уменьшенные масса и габариты по сравнению с корректорами, построенными в соответствии с традиционной однофазной топологией [5]. При общей относительной простоте построения силовой части многофазных корректоров коэффициента мощности требуют решения вопросы рациональной организации системы управления и выбора алгоритмов управления, способные обеспечить максимальную приближенность формы входного тока к синусоидальной. Обычно при использовании многофазной коррекции во входных токах появляются искажающие гармоники, что обусловлено несовершенством методов формирования сигнала управления [6].

Цель работы – предложить эффективный метод формирования сигнала управления

многофазным корректором коэффициента мощности, который позволит улучшить спектральный состав входного тока, а также разработать структуру системы управления силовой частью корректора, способной реализовать этот метод.

Обобщенная структура многофазного корректора коэффициента мощности и принцип его действия. Многофазный корректор коэффициента мощности выполняют в виде N параллельно соединенных унифицированных фаз, каждая из которых представляет собой импульсный преобразователь постоянного напряжения повышающего типа [3, 4]. Обобщенная структура многофазного корректора показана на рис. 1. Количество фаз N может варьироваться от двух и более. Выбор количества фаз обычно обуславливается конкретными требованиями к качеству входного тока, структурой используемой системы управления, а также соображениями разумной целесообразности.

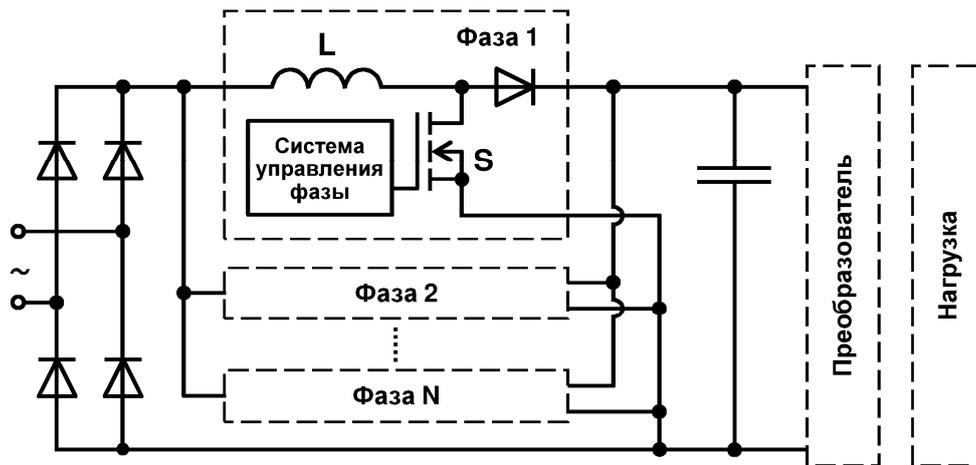


Рис. 1. Обобщенная структура многофазного корректора коэффициента мощности

Фазы коррекции могут работать в режиме непрерывного тока накопительной индуктивности L , в режиме прерывистого тока или в граничном режиме. При однофазной коррекции лучшей формы входного тока достигают, используя режим непрерывного тока накопительной индуктивности, однако этот режим, в отличие от двух других, не является энергоэффективным. При многофазной коррекции близкую к синусоидальной форму входного тока, который является суммой сдвинутых друг относительно друга токов фаз (i_1, i_2, \dots, i_N), можно получить, используя более энергоэффективный граничный режим работы фаз или режим прерывистого тока, близкого к граничному (рис. 2). Таким образом, применение многофазной коррекции позволяет как улучшить форму входного тока, так и повысить энергоэффективность схемы.

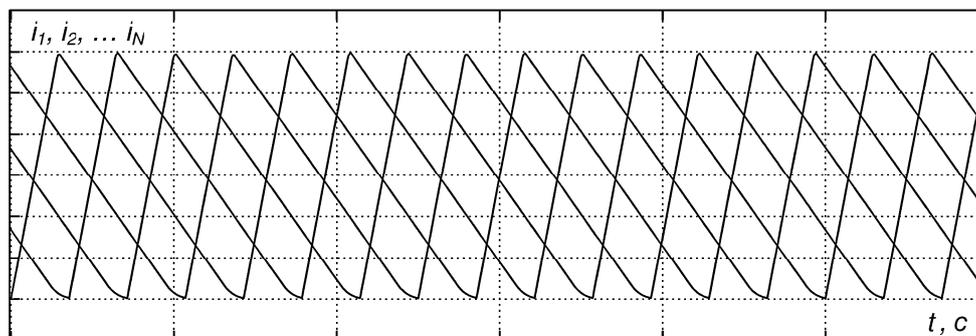


Рис. 2. Увеличенный фрагмент диаграмм токов фаз, сдвинутых относительно друг друга

Структура системы управления и метод формирования сигнала управления многофазным корректором. Для управления многофазным корректором коэффициента мощности могут быть использованы готовые микросхемы специализированных контроллеров, рассчитанные, как правило, на управление двумя фазами, или схемы с уникальной структурой. Преимущества и недостатки обоих подходов вполне очевидны. Однако следует отметить, что второй вариант предоставляет больше возможностей для оптимизации силовой части (выбора оптимального количества фаз) и режимов управления.

На рис. 3 приведена структура предлагаемой системы управления одной фазы коррекции. Ниже описаны принцип работы схемы и метод формирования сигнала управления, который она реализует.

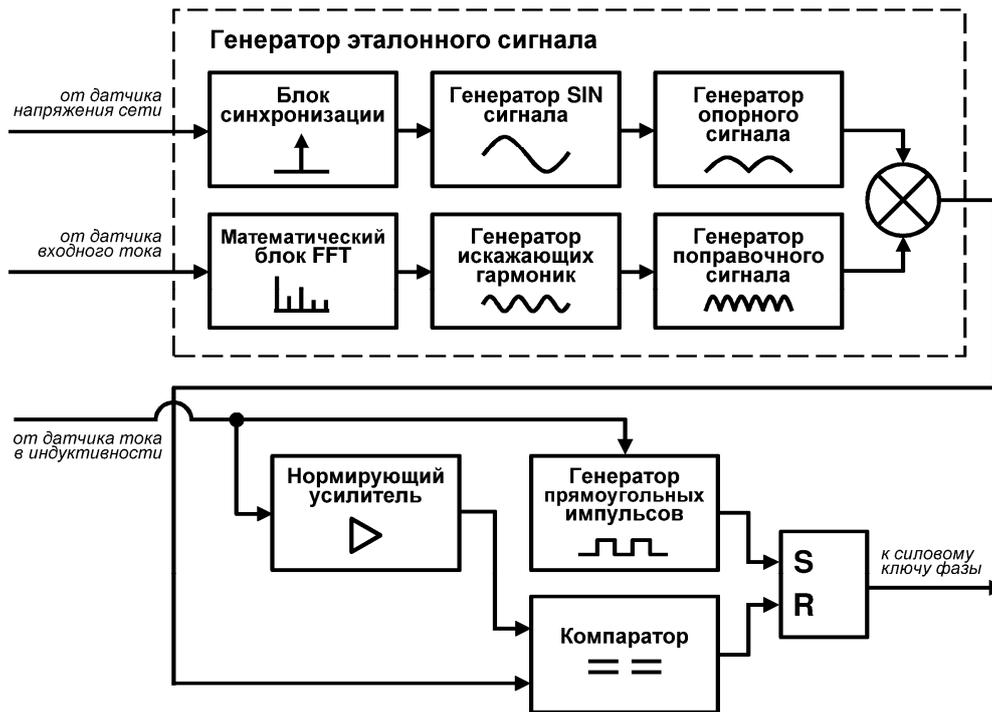


Рис. 3. Структура системы управления фазы корректора коэффициента мощности

Сразу после начала работы схемы генератор прямоугольных импульсов устанавливает триггер и включает силовой ключ *S* фазы корректора. Генератор эталонного сигнала формирует кривую, ограничивающую нарастание тока в индуктивности *L* фазы корректора. Нормирующий усилитель формирует сигнал, пропорциональный фактическому току в индуктивности *L*. Компаратор сравнивает сигналы с генератора эталонного сигнала и нормирующего усилителя и при достижении сигналом нормирующего усилителя текущего уровня эталонного сигнала сбрасывает триггер, который, в свою очередь, выключает силовой ключ *S* фазы. Таким образом, ток каждой фазы изменяется в пределах от нуля до текущего значения эталонного сигнала.

Сдвиг между токами фаз коррекции рассчитывают по формуле:

$$\varphi = (i - 1) \cdot T / N, \tag{1}$$

где *T* – период прямоугольного сигнала; *N* – количество фаз коррекции; *i* – номер фазы.

Частоту импульсов, которые формирует генератор прямоугольных импульсов, предварительно вычисляют с учетом величины тока в индуктивности фазы таким образом, чтобы обеспечить режим протекания тока, близкий к граничному.

С целью максимального приближения формы входного тока к синусоидальной эталонный сигнал фазы формируют путем «подмешивания» (добавления) искажающих гармоник

(поправочного сигнала) в противофазе к опорному сигналу. Опорный сигнал формируют следующим образом: сначала генератор синусоидального сигнала формирует сигнал, синхронизированный с помощью блока синхронизации с напряжением сети, далее генератор опорного сигнала вычисляет его абсолютную величину. Формирование поправочного сигнала осуществляют следующим образом: генератор искажающих гармоник выделяет соответствующий сигнал с помощью быстрого преобразования Фурье сигнала входного тока, которое выполняет математический блок FFT, далее генератор поправочного сигнала вычисляет его абсолютную величину. Коррекция опорного сигнала происходит с задержкой, обусловленной временем, необходимым для осуществления быстрого преобразования Фурье и вычисления поправочного сигнала.

С помощью имитационного моделирования было проведено исследование качества входного тока источника питания для контактной микросварки без использования корректора коэффициента мощности и с его использованием. При этом были применены два разных метода формирования сигналов управления многофазным корректором, в том числе описанный выше. Количественная оценка качества входного тока была осуществлена путем расчета коэффициента гармонических искажений ($THDi$):

$$THDi = \frac{\sqrt{i_2^2 + i_3^2 + \dots + i_k^2}}{i_1}, \quad (2)$$

где i_1 – амплитуда основной гармоники входного тока; i_2, i_3, i_k – амплитуды высших гармоник входного тока.

На рис. 4 показаны диаграммы входного тока источника питания для контактной микросварки, полученные в результате имитационного моделирования: (а) – без использования корректора коэффициента мощности; (б) – при использовании четырехфазного корректора коэффициента мощности, но без «подмешивания» поправочного сигнала; (в) – при использовании четырехфазного корректора коэффициента мощности с «подмешиванием» поправочного сигнала.

Как видно из рисунка, при формировании сигналов управления корректором без «подмешивания» поправочного сигнала форма входного тока имеет существенные искажения (рис. 4 б), тогда как при использовании предлагаемого метода форма входного тока является почти синусоидальной (рис. 4 в). При этом количественная оценка качества входного тока показала следующее: без использования корректора коэффициента мощности коэффициент гармонических искажений тока ($THDi$) составил 158,6%; при использовании четырехфазного корректора коэффициента мощности без «подмешивания» поправочного сигнала – 27,9%; при использовании предложенного метода формирования сигнала управления – 4,7%. В последнем случае значение $THDi$ соответствует как отечественным, так и европейским показателям качества электроэнергии.

Выводы. Как показали результаты имитационного моделирования, предложенный в работе метод формирования сигнала управления многофазным корректором коэффициента мощности позволяет получить входной ток, максимально приближенный к синусоидальному. При этом количественная оценка качества входного тока продемонстрировала его соответствие требованиям существующих стандартов качества электроэнергии.

Дальнейшие исследования по этой теме планируем проводить в направлении оптимизации структуры многофазного корректора, а именно: выбора и обоснования количества унифицированных фаз коррекции, а также установления зависимости между количеством фаз и качеством входного тока. Кроме того, интерес представляет исследование и сравнение различных режимов управления, используемых в схемах многофазных корректоров.

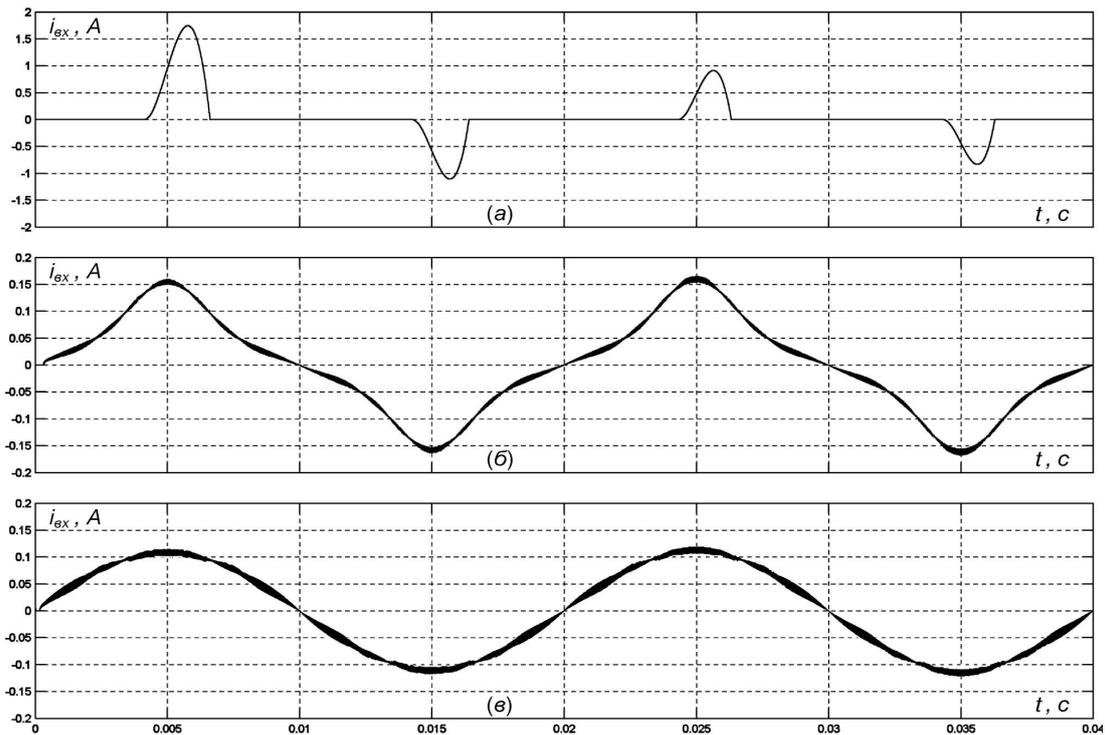


Рис. 4. Диаграммы входного тока источника питания для контактной микросварки, полученные в результате имитационного моделирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Письменный О. О. Підвищення ефективності систем живлення машин для контактного точкового зварювання: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» / О. О. Письменный. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ. – Київ, 2008. – 17 с.
2. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью / [А. К. Шидловский и др.]. – Київ: Наук. думка, 1993. – 272 с.
3. Schafmeister F. Scalable Multi Phase Interleaved Boundary Mode PFC Concept enabling Energy- and Cost Efficient PSUs in the kW-Range / F. Schafmeister, X. Wang, T. Grote, P. Ide // Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 2010. – P. 3831 – 3835.
4. Grote T. Digital Control Strategy for Multi-Phase Interleaved Boundary Mode and DCM Boost PFC Converters / T. Grote, H. Figge, N. Fröhleke, J. Böcker, F. Schafmeister // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – 2011. – P. 3186 – 3192.
5. Zambada J. Interleaved Power Factor Correction. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.microchip.com/webinars.microchip.com/WebinarDetails.aspx?dDocName=en548529>.
6. Xu P. Multiphase Voltage Regulator Modules with Magnetic Integration to Power Microprocessors: PhD thesis / Xu P. – Virginia Polytechnic Institute and State University. – Blacksburg, 2002. – 204 p.

Сафронов Павел Сергеевич – к. т. н., доцент кафедры электронных систем, +380509462789, p.s.safronov@gmail.com.

Кучеренко Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры электронных систем, +380997441484, revolt.kdv@gmail.com.

Бондаренко Юлия Валерьевна – к. т. н., доцент кафедры электронных систем, +380953097380, bondarenko.julie@gmail.com.

Донбасский государственный технический университет.

Бондаренко Александр Федорович – к. т. н., доцент, докторант кафедры промышленной электроники, +380506443962, bondarenkoaf@gmail.com.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».

Сидорец Владимир Николаевич – д. т. н., профессор, ведущий научный сотрудник отдела физики газового разряда и техники плазмы, +380938174156, sydorvn@gmail.com.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.