

УДК 621.314: 621.311.6

**П. С. Сафронов, к. т. н., доц.; Д. В. Кучеренко; Ю. В. Бондаренко, к. т. н.;
О. Ф. Бондаренко, к. т. н., доц.; В. М. Сидорець, д. т. н., проф.**

ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ КЕРУВАННЯ БАГАТОФАЗНИМ КОРЕКТОРОМ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ

З метою поліпшення електромагнітної сумісності джерел живлення з мережею запропоновано використовувати схемну топологію з багатофазним коректором коефіцієнта потужності. Спосіб реалізації багатофазного коректора коефіцієнта потужності передбачає роботу кожної уніфікованої фази в режимі переривчастого струму, близького до граничного, а сигнал керування коректором формується з урахуванням спектрального складу вхідного струму, що дозволяє отримати вхідний струм, наближений до синусоїдального. За допомогою імітаційного моделювання виконано оцінку коефіцієнта гармонічних спотворень досліджуваної схеми та підтверджено ефективність запропонованих рішень.

Ключові слова: джерело живлення, багатофазний коректор коефіцієнта потужності, сигнал керування, коефіцієнт гармонічних спотворень.

Вступ. У сучасних умовах постійного зростання кількості використовуваних електронних приладів, пристроїв та систем побутового і промислового призначення, які являють собою нелінійні навантаження для мережі живлення, актуальним напрямком досліджень та розробок залишається поліпшення електромагнітної сумісності споживачів з мережею. Окремо в цьому контексті слід відзначити джерела живлення для електротехнологічних установок, таких як установки контактного зварювання, які в процесі роботи споживають з мережі різко несинусоїдальний струм, що призводить до «забруднення» мережі та збільшення енергетичних втрат [1].

Ефективним способом поліпшення електромагнітної сумісності джерела живлення з мережею (на рівні з пасивною та активною фільтрацією) є корекція коефіцієнта потужності [2]. Цей спосіб полягає у введенні в схему джерела живлення (у вхідну її частину) спеціального кола корекції, яке забезпечує споживання джерелом живлення струму, форма якого є наближеною до синусоїдальної.

Перспективним підходом до створення коректорів коефіцієнта потужності вважають їх побудову за багатофазним принципом [3, 4]. Ця тема є новою для вітчизняного наукового простору. Публікації, присвячені дослідженню багатофазних коректорів коефіцієнта потужності (Multiphase Interleaved Power Factor Corrector), з'являються здебільшого в закордонних виданнях. Суть підходу полягає у використанні кількох уніфікованих кіл корекції, з'єднаних паралельно та працюючих зі зсувом за фазою. Перевагами побудови коректорів коефіцієнта потужності за багатофазним принципом є підвищена енергоефективність, знижені пульсації вхідного та вихідного струмів та зменшені маса й габарити порівняно з коректорами, побудованими за традиційною однофазною топологією [5]. При загальній відносній простоті побудови силової частини багатофазних коректорів коефіцієнта потужності потребують розв'язання питання раціональної організації системи керування та вибору алгоритмів керування, здатні забезпечити максимальну наближеність форми вхідного струму до синусоїдальної. Зазвичай під час використання багатофазної корекції у вхідних струмах з'являються спотворювальні гармоніки, що зумовлено недосконалістю методів формування сигналу керування [6].

Мета цієї роботи – запропонувати ефективний метод формування сигналу керування багатофазним коректором коефіцієнта потужності, який дозволить поліпшити спектральний склад вхідного струму, а також розробити структуру системи керування силовою частиною

коректора, здатною реалізувати цей метод.

Узагальнена структура багатофазного коректора коефіцієнта потужності та принцип його дії. Багатофазний коректор коефіцієнта потужності виконують у вигляді N паралельно з'єднаних уніфікованих фаз, кожна з яких являє собою імпульсний перетворювач постійної напруги підвищувального типу [3, 4]. Узагальнена структура багатофазного коректора показана на рис. 1. Кількість фаз N може варіюватись від двох і більше. Вибір кількості фаз зазвичай зумовлюється конкретними вимогами до якості вхідного струму, структурою системи керування, яку використовують, а також міркуваннями розумної доцільності.

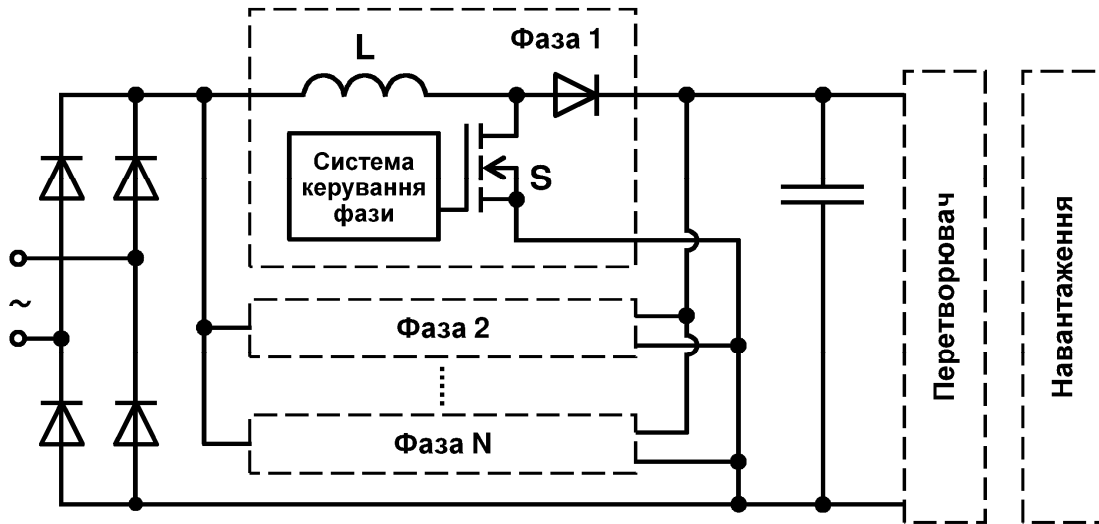


Рис. 1. Узагальнена структура багатофазного коректора коефіцієнта потужності

Фази корекції можуть працювати в режимі безперервного струму накопичувальної індуктивності L , у режимі переривчастого струму або в граничному режимі. За однофазної корекції найкращої форми вхідного струму досягають, використовуючи режим безперервного струму накопичувальної індуктивності, однак цей режим, на відміну від інших двох, не є енергоефективним. За багатофазної корекції близьку до синусоїдальної форму вхідного струму, який є сумою зсунутих відносно один одного струмів фаз (i_1, i_2, \dots, i_N), можна отримати, використовуючи більш енергоефективний граничний режим роботи фаз або режим переривчастого струму, близький до граничного (рис. 2). Отже, застосування багатофазної корекції дозволяє як покращити форму вхідного струму, так і підвищити енергоефективність схеми.

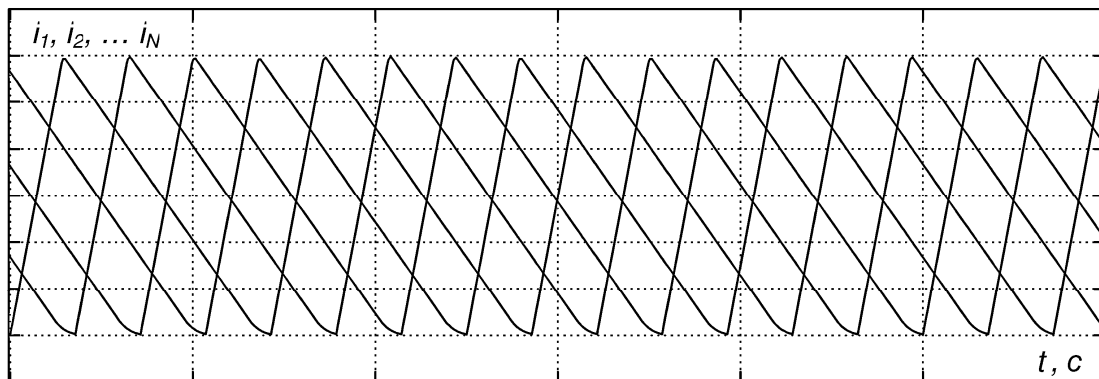


Рис. 2. Збільшений фрагмент діаграм струмів фаз, зсунутих відносно один одного

Структура системи керування та метод формування сигналу керування багатофазним коректором. Для керування багатофазним коректором коефіцієнта потужності можуть бути використані готові мікросхеми спеціалізованих контролерів, розраховані, як правило, на керування двома фазами, або схеми з унікальною структурою. Переваги та недоліки обох підходів є цілком очевидними. Проте слід зазначити, що другий варіант надає більше можливостей для оптимізації силової частини (вибору оптимальної кількості фаз) та режимів керування.

На рис. 3 наведена структура системи керування однієї фази корекції, яку пропонують. Нижче описано принцип роботи схеми та метод формування сигналу керування, який вона реалізує.

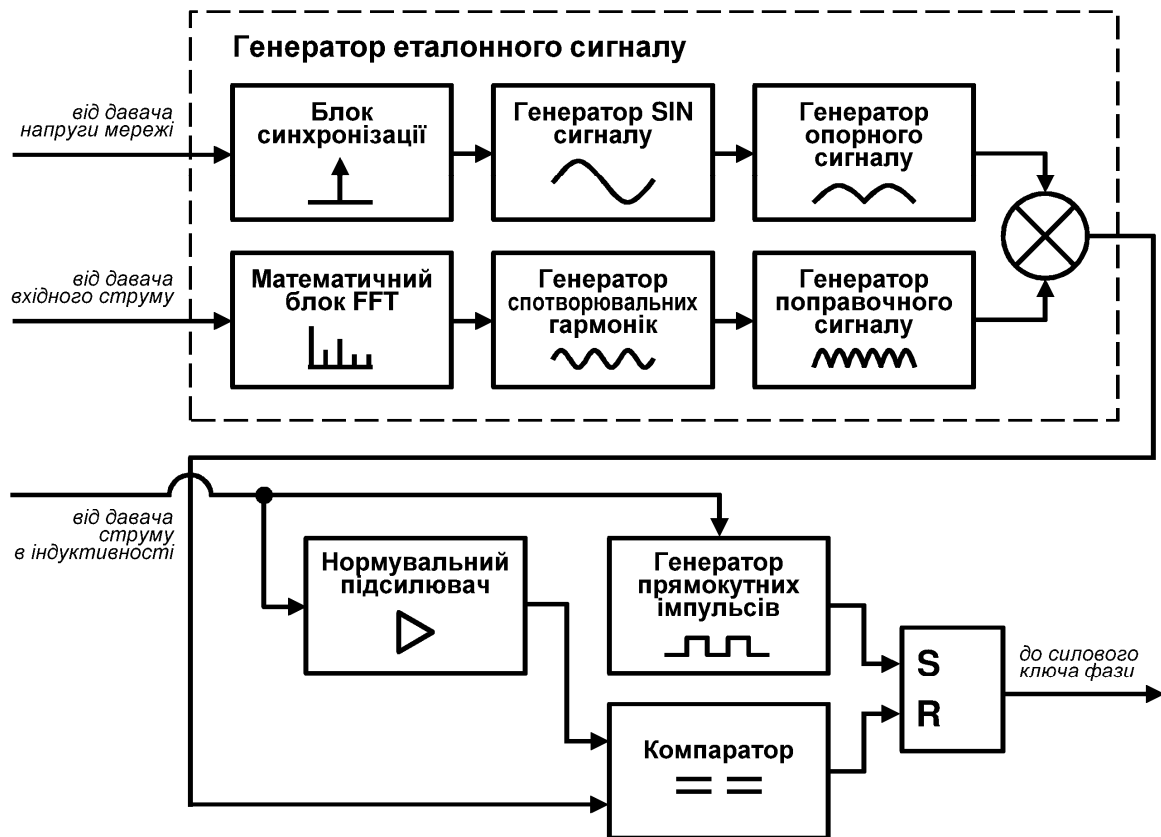


Рис. 3. Структура системи керування фази коректора коефіцієнта потужності

Одразу після початку роботи схеми генератор прямокутних імпульсів встановлює тригер і вмикає силовий ключ S фази коректора. Генератор еталонного сигналу формує криву, що обмежує наростання струму в індуктивності L фази коректора. Нормувальний підсилювач формує сигнал, пропорційний фактичному струму в індуктивності L . Компаратор порівнює сигнали з генератора еталонного сигналу та нормувального підсилювача і за досягнення сигналом нормувального підсилювача поточного рівня еталонного сигналу скидає тригер, який, у свою чергу, вимикає силовий ключ S фази. Отже, струм кожної фази змінюється в межах від нуля до поточного значення еталонного сигналу.

Зсув між струмами фаз корекції розраховують за формулою:

$$\varphi = (i - 1) \cdot T / N, \quad (1)$$

де T – період прямокутного сигналу; N – кількість фаз корекції; i – номер фази.

Частоту імпульсів, які формує генератор прямокутних імпульсів, попередньо обчислюють з урахуванням величини струму в індуктивності фази таким чином, щоб забезпечити режим протікання струму, близький до граничного.

З метою максимального наближення форми вхідного струму до синусоїдальної еталонний сигнал фази формують шляхом «підмішування» (додавання) спотворювальних гармонік (поправочного сигналу) у протифазі до опорного сигналу. Опорний сигнал формують так: спочатку генератор синусоїдального сигналу формує сигнал, синхронізований за допомогою блоку синхронізації з напругою мережі, далі генератор опорного сигналу обчислює його абсолютну величину. Формування поправочного сигналу здійснюють так: генератор спотворювальних гармонік виділяє відповідний сигнал за допомогою швидкого перетворення Фур'є сигналу вхідного струму, який виконує математичний блок FFT, далі генератор поправочного сигналу обчислює його абсолютну величину. Корекція опорного сигналу відбувається із затримкою, зумовленою часом, необхідним для здійснення швидкого перетворення Фур'є та обчислення поправочного сигналу.

За допомогою імітаційного моделювання було проведено дослідження якості вхідного струму джерела живлення для контактного мікрозварювання без використання коректора коефіцієнта потужності та з його використанням. При цьому були застосовані два різні методи формування сигналів керування багатофазним коректором, серед яких і описаний вище. Кількісна оцінка якості вхідного струму була здійснена шляхом розрахунку коефіцієнта гармонічних спотворень ($THDi$):

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

де i_1 – амплітуда основної гармоніки вхідного струму; i_2, i_3, i_k – амплітуди вищих гармонік вхідного струму.

На рис. 4 показані діаграми вхідного струму джерела живлення для контактного мікрозварювання, отримані в результаті імітаційного моделювання: (а) – без використання коректора коефіцієнта потужності; (б) – за використання чотирифазного коректора коефіцієнта потужності, але без «підмішування» поправочного сигналу; (в) – за використання чотирифазного коректора коефіцієнта потужності з «підмішуванням» поправочного сигналу.

Як видно з рисунка, під час формування сигналів керування коректором без «підмішування» поправочного сигналу форма вхідного струму має суттєві спотворення (рис. 4 б), тоді як за використання запропонованого методу форма вхідного струму є майже синусоїдальною (рис. 4 в). При цьому кількісна оцінка якості вхідного струму показала таке: без використання коректора коефіцієнта потужності коефіцієнт гармонічних спотворень струму ($THDi$) склав 158,6 %; за використання чотирифазного коректора коефіцієнта потужності без «підмішування» поправочного сигналу – 27,9 %; за використання запропонованого методу формування сигналу керування – 4,7 %. В останньому випадку значення $THDi$ відповідає як вітчизняним, так і європейським показникам якості електроенергії.

Висновки. Як показали результати імітаційного моделювання, запропонований в роботі метод формування сигналу керування багатофазним коректором коефіцієнта потужності дозволяє отримати вхідний струм, максимально наближений до синусоїдального. При цьому кількісна оцінка якості вхідного струму продемонструвала його відповідність вимогам чинних стандартів якості електроенергії.

Подальші дослідження за цією темою плануємо проводити в напрямку оптимізації структури багатофазного коректора, а саме: вибору та обґрунтування кількості уніфікованих фаз корекції, а також встановлення залежності між кількістю фаз та якістю вхідного струму. Крім того, інтерес представляє дослідження та порівняння різних режимів керування, які використовують у схемах багатофазних коректорів.

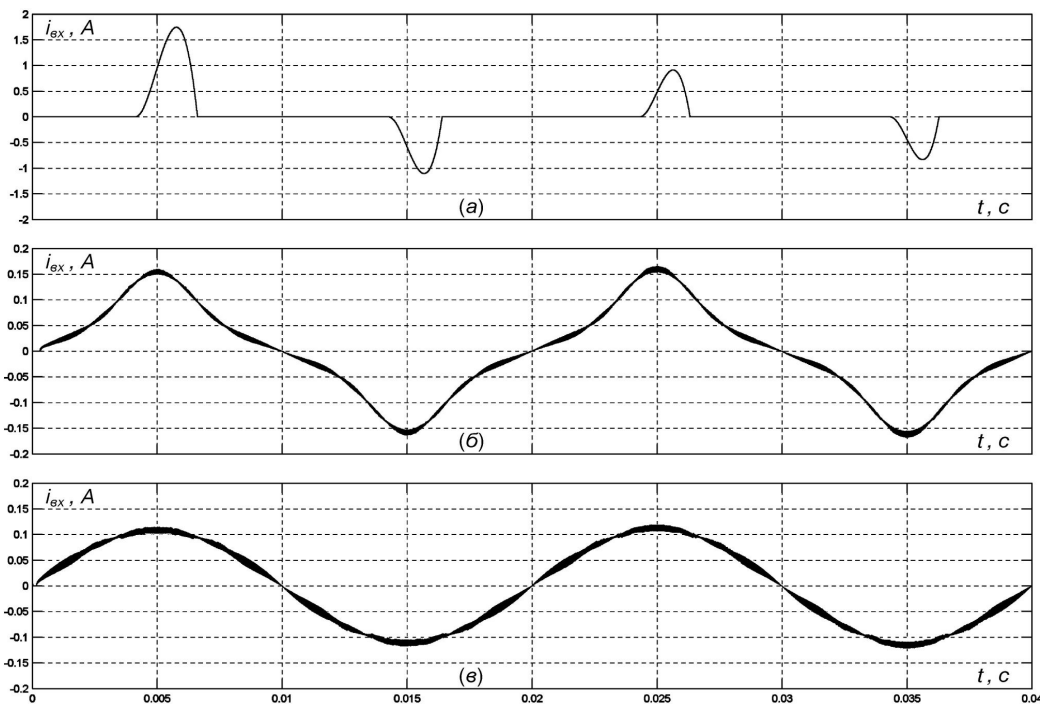


Рис. 4. Діаграми вхідного струму джерела живлення для контактної мікрозварювання, отримані в результаті імітаційного моделювання

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Письменний О. О. Підвищення ефективності систем живлення машин для контактної точкового зварювання: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» / О. О. Письменний. – 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.

Сафронів Павло Сергійович – к. т. н., доцент кафедри електронних систем, +380509462789, p.s.safronov@gmail.com.

Кучеренко Дмитро Володимирович – аспірант кафедри електронних систем, +380997441484, revolt.kdv@gmail.com.

Бондаренко Юлія Валеріївна – к. т. н., доцент кафедри електронних систем, +380953097380, bondarenko.julie@gmail.com.

Донбаський державний технічний університет.

Бондаренко Олександр Федорович – к. т. н., доцент, докторант кафедри промислової електроніки, +380506443962, bondarenkoaf@gmail.com.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

Сидорець Володимир Миколайович – д. т. н., професор, провідний науковий співробітник відділу фізики газового розряду та техніки плазми, +380938174156, sydorvn@gmail.com.

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

Наукові праці ВНТУ, 2015, № 1