

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.

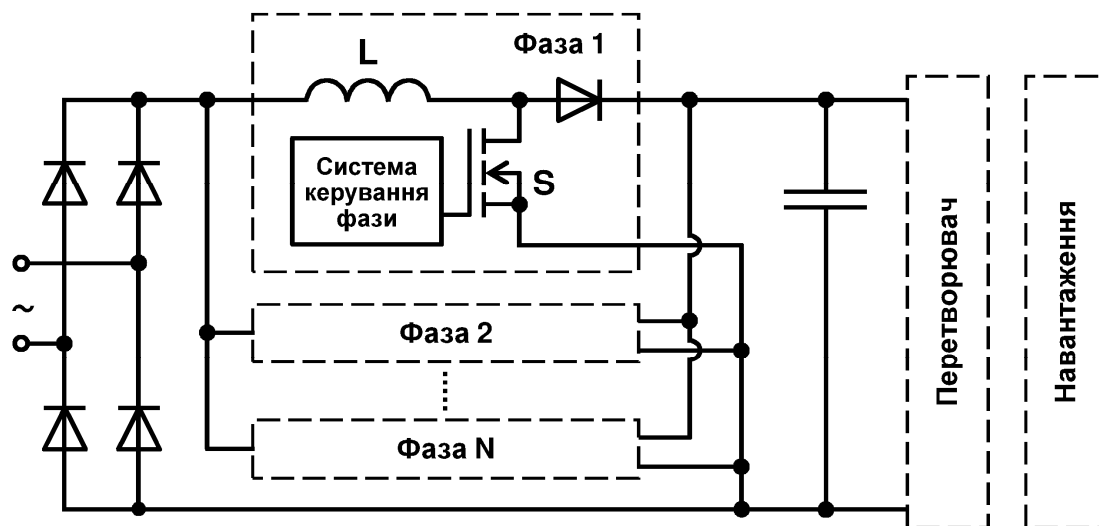


Рис. 1. Узагальнена структура багатофазного коректора коефіцієнта потужності

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.

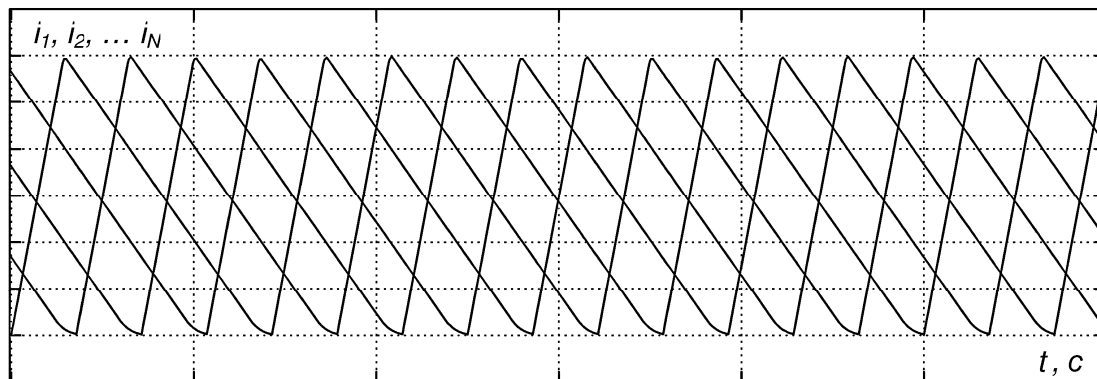


Рис. 2. Збільшений фрагмент діаграм струмів фаз, зсунутих відносно один одного

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.

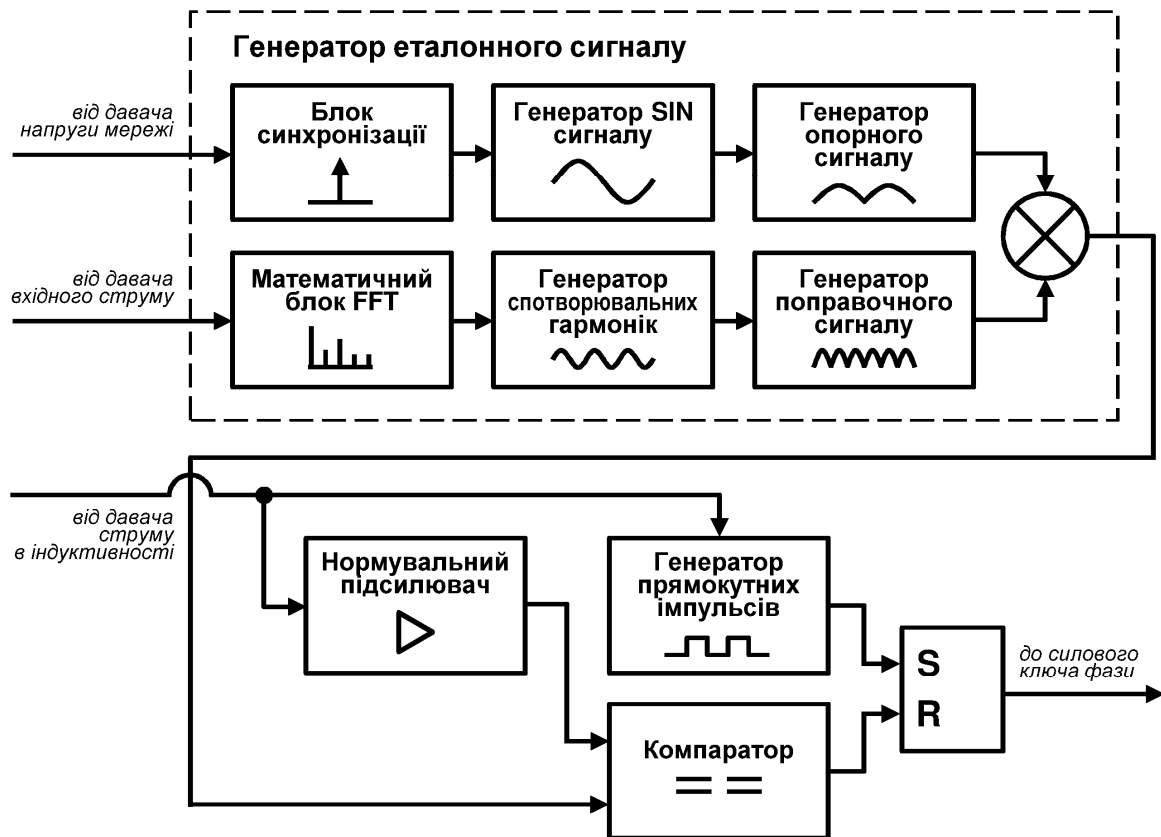


Рис. 3. Структура системи керування фази коректора коефіцієнта потужності

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.

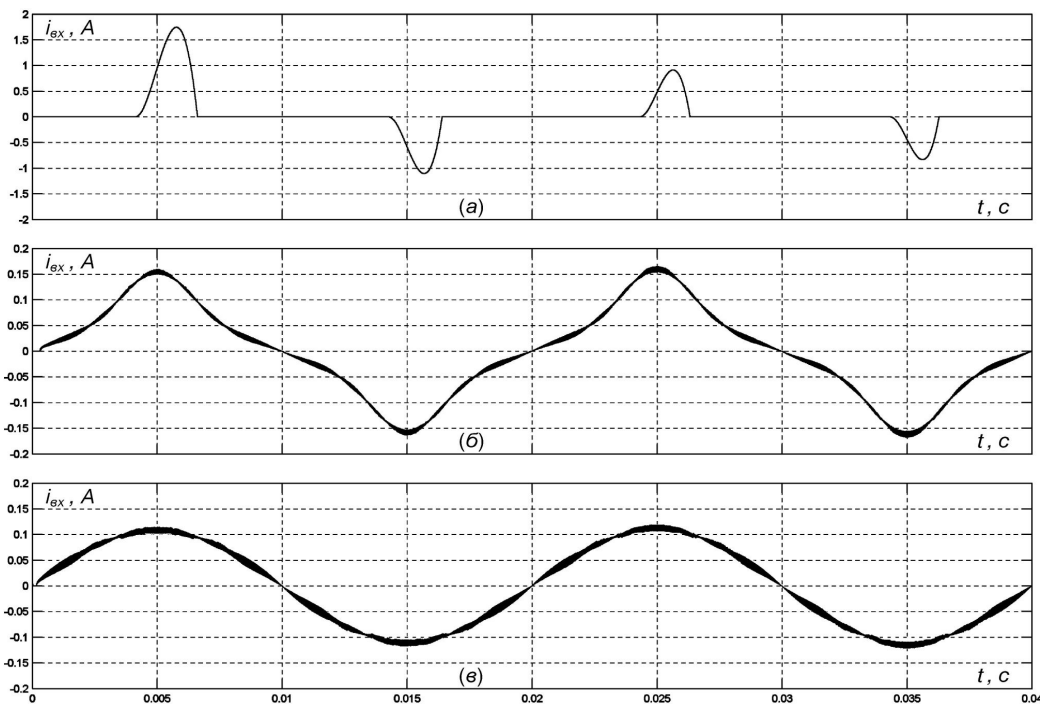


Рис. 4. Діаграми вхідного струму джерела живлення для контактного мікрозварювання, отримані в результаті імітаційного моделювання

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Письменний 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. 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

P. S. Safronov, Cand. Sc. (Eng.), Ass. Prof.; D. V. Kucherenko; I. V. Bondarenko, Cand. Sc. (Eng.); O. F. Bondarenko, Cand. Sc. (Eng.), Ass. Prof.; V. M. Sydorets, Dc. Sc. (Eng.), Prof.

FORMATION OF CONTROL SIGNAL FOR A MULTIPHASE INTERLEAVED POWER FACTOR CORRECTOR

The paper proposes to use circuit topology with a multiphase interleaved power factor corrector in order to improve electromagnetic compatibility of power sources with the network. The method for realization of the multiphase power factor corrector provides operation of each unified phase in the mode of intermittent current, that is close to boundary current, while the corrector control signal is formed taking into account spectral composition of the input current. This makes it possible to obtain close-to-sinusoidal input current. Using simulation modeling, total harmonic distortion of the circuit under study has been estimated and the efficiency of the proposed solutions has been confirmed.

Key words: power source, multiphase interleaved power factor corrector, control signal, total harmonic distortion.

Introduction

Under current conditions of constantly growing number of electronic instruments, devices and systems for domestic and industrial application, which are nonlinear loads for power networks, improvement of electromagnetic compatibility of the consumers with the network is an important direction of research and developments. In this context we should separately mention power sources for electrotechnical installations, such as resistance welding installations, that consume a sharply non-sinusoidal current. This leads to “contamination” of the network and to increased power losses [1].

Along with passive and active filtration, power factor correction is an efficient method to improve electromagnetic compatibility of the power source with the network [2]. This method consists in introduction of a special correction circuit into the power supply circuit (into its input part), which provides consumption of the current by the power sources, the shape of which is close to sinusoidal current.

Building power factor correctors according to the multiphase principle is considered to be a perspective approach to their creation [3, 4]. This approach is relatively new for the domestic research space. Publications dealing with investigation of multiphase interleaved power factor correctors have been appearing, mainly, in foreign editions. The approach consists in the application of several unified correction circuits, connected in parallel, which operate with a phase shift. Advantages of building power factor correctors according to the multiphase principle are as follows: increased power efficiency, reduced pulsations of input and output currents as well as reduced mass and size as compared with correctors built in accordance with traditional single-phase topology [5]. Along with relatively simple construction of the power part of multiphase power factor correctors, it is necessary to solve the problems of rational organization of the control system and control algorithm selection, which can provide the input current shape that will be maximally close to sinusoidal current [6].

The aim of this work is to propose an efficient method for control signal formation by a multiphase power factor corrector, which will enable improvement of the spectral composition of input current, and development of such control system structure for the power part of the corrector, which is capable of this method implementation.

Generalized structure of the multiphase power factor corrector and its operating principle

The multiphase power factor corrector is built in the form of N unified phases, connected in parallel. Each of them is a pulse DC boost converter [3, 4]. A generalized structure of the multiphase converter is shown in Fig. 1. The number of phases N could vary from two to more phases. The choice of the number of phases is determined by specific requirements to input current quality, the structure of control system and expediency considerations.

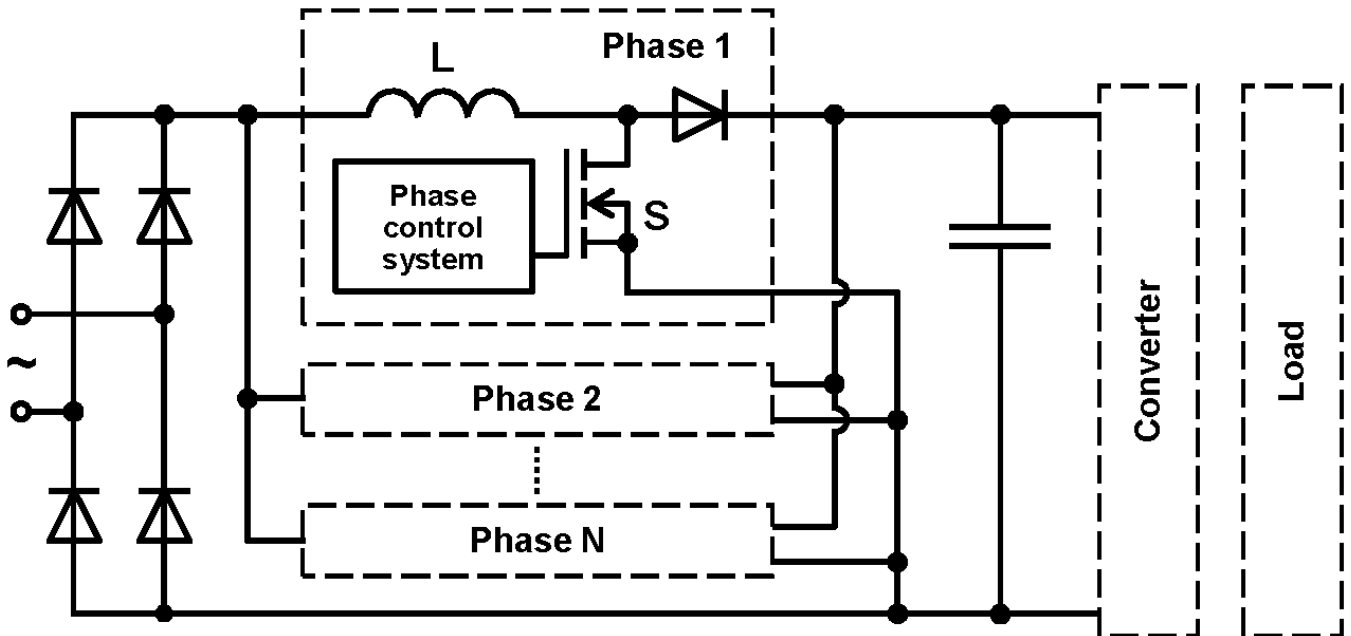


Fig. 1. A generalized structure of the multiphase power factor corrector

Correction phases can operate in the mode of continuous current of accumulative inductance L , in the intermittent current mode or in the boundary mode. With single-phase correction, the best input current shape is achieved using the mode of continuous current of accumulative inductance. However, this mode is not so power efficient as compared with two others. For multiphase correction a close-to-sinusoidal shape of input current, which is the sum of the phase currents (i_1, i_2, \dots, i_N) shifted relative to each other, can be obtained using a more power-efficient boundary mode of phase operation or the mode of intermittent current, which is close to boundary mode (Fig. 2). Thus, application of multiphase correction makes it possible to improve both the input current shape and to increase power efficiency of the circuit.

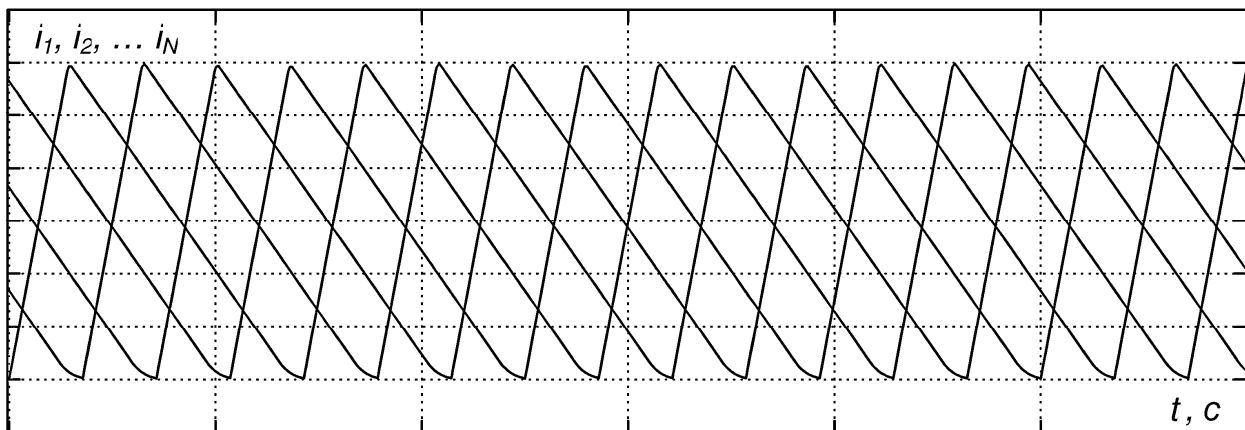


Fig. 2. Enlarged fragment of the diagrams of the currents of phases shifted relative to each other

Control system structure and the method of control signal formation by the multiphase corrector

For controlling the multiphase power factor corrector ready microcircuits of specialized controllers could be used, which are designed, as a rule, for controlling two phases, as well as circuits having unique structures.

Advantages and drawbacks of both approaches are evident. It should be noted, however, that the second variant gives more possibilities for optimization of the power part (the choice of optimal quantity of phases) and of the control modes.

Fig. 3 presents a structure of the proposed control system of one correction phase. Operation principle of the circuit and control signal formation method, that it realizes, are described below.

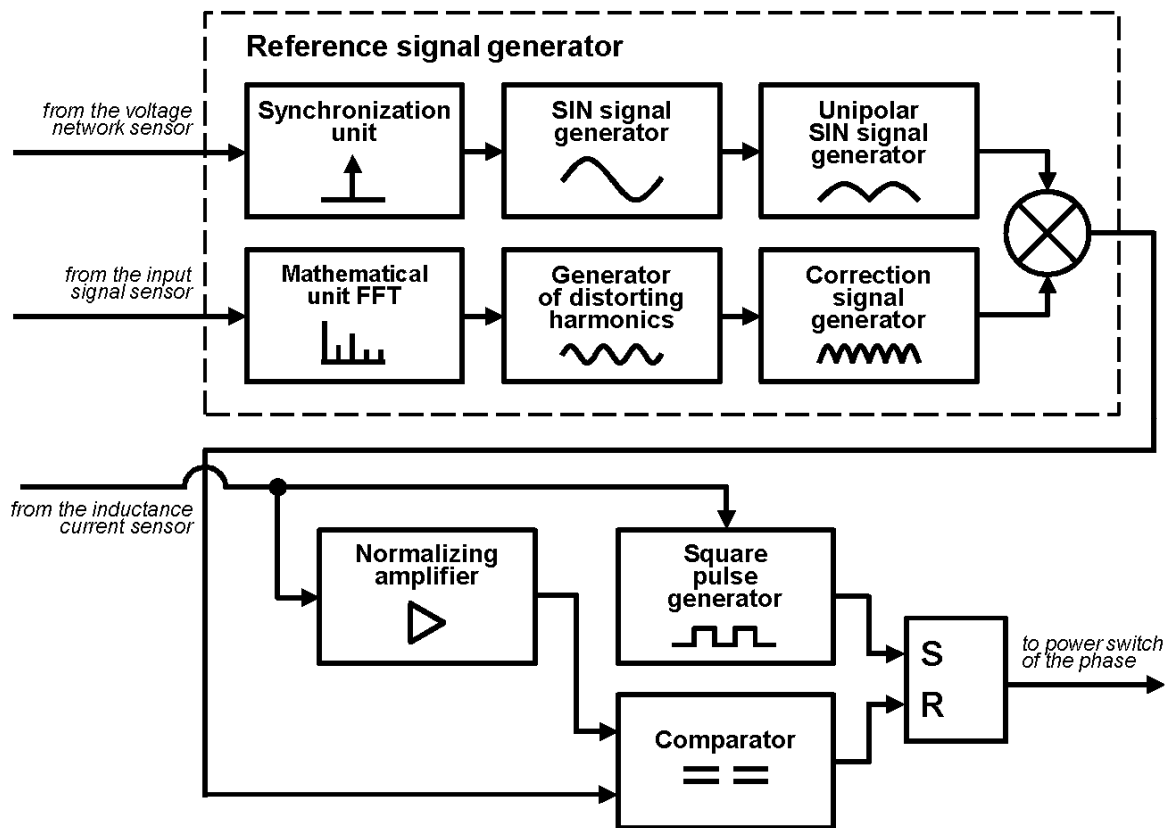


Fig. 3. Structure of the control system of the power factor corrector phase

Immediately after the circuit starts operation, the square pulse generator sets the trigger and turns on power switch S of the corrector phase. Reference signal generator forms a curve that limits growth of the current in inductance L of the corrector phase. The comparator compares signals from the reference signal generator with those from the normalizing amplifier and, when the normalizing amplifier signal reaches current level of the reference signal, it resets the trigger, which, in turn, turns off the power switch S of the phase. So, the current of each phase varies in the range from zero to current value of the reference signal.

Shift between the currents of correction phases is calculated by the formula:

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

where T is square signal period; N – number of correction phases; i – phase number.

Frequency of pulses, formed by the square-pulse generator, is preliminary calculated taking into account the value of current in the phase inductance so that close-to-boundary current mode is provided.

In order to achieve maximal approximation of the input current shape to sinusoidal current, phase signal is formed by adding distorting harmonics (of the correction signal) in counterphase to the reference signal. Reference signal is formed as follows. First, the sinusoidal signal generator forms a signal, synchronized with the network current by means of synchronization unit, and then the unipolar SIN signal generator calculates its absolute value. Correction signal formation is realized in the following way. Generator of distorting harmonics creates a corresponding signal by means of fast Fourier transformation of the input current signal, which is performed by the mathematical unit FFT. Then the correction signal generator computes its absolute value. Reference signal correction is carried out with a delay, caused by the time required for fast Fourier transformation and correction signal computation.

Using simulation modeling, quality of the input current of the power supply for resistance microwelding was investigated without application of the power factor corrector and with its application. For this, two different methods for forming multiphase corrector control signals were used, including the method described above. Quantitative estimation of the input current quality was carried out by calculation of the total harmonic distortion ($THDi$):

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

where i_1 – amplitude of fundamental harmonic of the input current; i_2, i_3, i_k , – amplitudes of the higher harmonics of the input current.

Fig. 4 shows diagrams of the input current of the power supply for resistance microwelding, obtained as a result of simulation modeling: without application of the power factor corrector; with the application of four-phase power factor corrector but without addition of the correction signal; (c) with the application of four-phase correction and the addition of correction signal.

As it is evident from Fig. 4, when control signals are formed by the corrector without “admixture” of correction signal, input current shape has significant distortions (Fig. 4 b), while when the proposed method is used, the input signal shape is almost sinusoidal (Fig. 4 c). Quantitative estimation of the input current quality has shown the following: if the power factor corrector is not used, total harmonic distortion of current ($THDi$) was 158,6%; with the application of four-phase power factor corrector without “admixture” of the correction signal – 27,9%; with the application of the proposed method for correction signal formation – 4,7%. In the last case $THDi$ value corresponds to both domestic and European indices of electric energy quality.

Conclusions

As the simulation results have shown, the proposed method of control signal formation by multiphase power factor correctors makes it possible to obtain current, which is maximally approximated to sinusoidal current. At the same time, quantitative estimation of the input current quality has demonstrated its correspondence to the requirements of the respective standards of electric energy quality.

Further research on this topic is planned to be carried out in the direction of the multiphase corrector structure optimization: choice and substantiation of the number of unified correction phases as well as determination of the relationship between the number of phases and input current quality. Of interest is also investigation and comparison of different control modes used in the circuits of multiphase correctors.

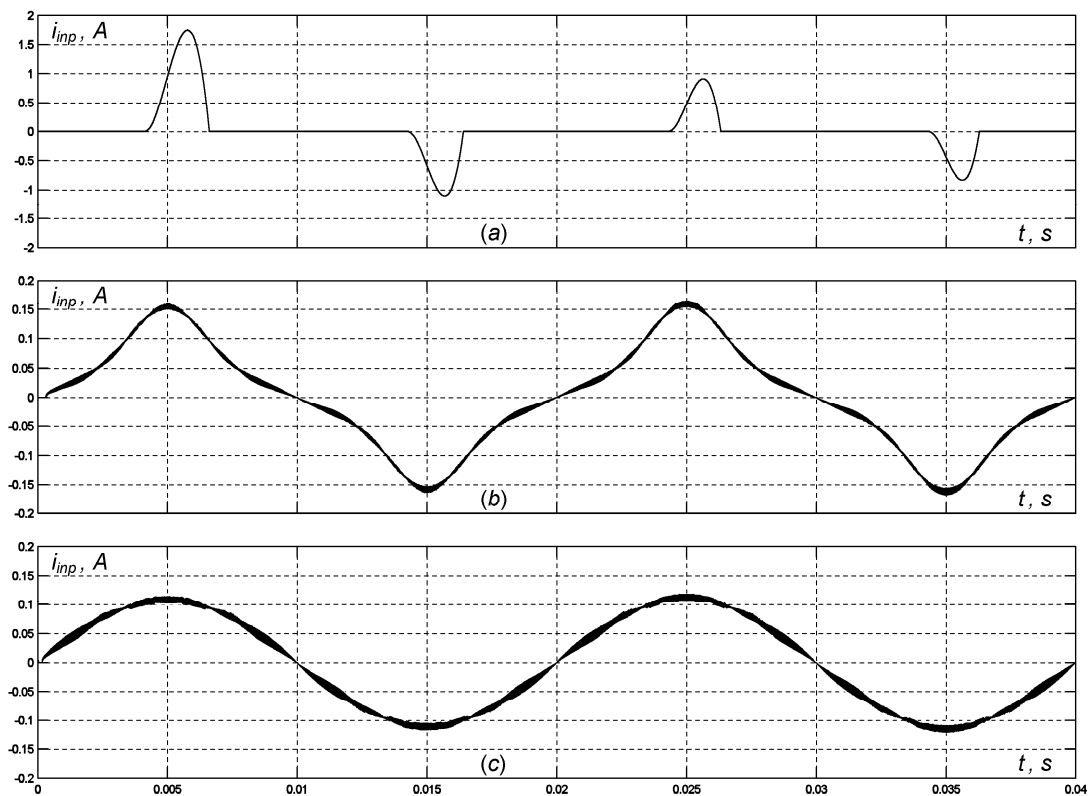


Fig. 4. Diagrams of the input current of resistance microwelding power supply, obtained as a result of simulation

REFERENCES

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.

Safronov Pavlo – Cand. Sc. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Electronic Systems of Donbass State Technical University, p.s.safronov@gmail.com.

Kucherenko Dmytro – Postgraduate student of the Department of Electronic Systems of Donbass State Technical University, revolt.kdv@gmail.com.

Bondarenko Iuliia – Cand. Sc. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Electronic systems of Donbass State Technical University, bondarenko.julie@gmail.com.

Bondarenko Oleksandr – Cand. Sc., Ass. Prof. of the Industrial Electronics Department of National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, bondarenkoaf@gmail.com.

Sydorets Volodymyr – Dc. Sc. (Eng.), Prof., Leading Researcher of Gas Discharge and Plasma Engineering Department of Paton Electric Welding Institute of NAS, sydorvn@gmail.com.