

## Силовая электроника

УДК 621.314

**Ю.С. Демченко, В.В. Рогаль**, канд. техн. наук

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

### Методи корекції коефіцієнта потужності

*У даній статті показана можливість виникнення проблем електромагнітної сумісності при роботі різного устаткування та обґрунтована необхідність використання коректорів коефіцієнта потужності для зменшення негативного впливу споживачів електроенергії на живлячу мережу. Розглянуто основні методи корекції коефіцієнта потужності. Проведено порівняння методів керування високочастотними пристроями корекції коефіцієнта потужності, для кожного методу приведена функціональна електрична схема. Вказані переваги цифрових систем керування над аналоговими. Зроблено прогноз про можливий у майбутньому перехід до цифрових систем корекції коефіцієнта потужності. Бібл. 6, рис. 5.*

**Ключові слова:** коефіцієнт потужності, коректор коефіцієнта потужності, електромагнітна сумісність, метод керування, цифрове керування.

#### Вступ

Включення в мережу змінного струму нелінійних навантажень, наприклад, світильників з газорозрядними лампами, керованих електродвигунів, імпульсних джерел живлення приводить до того, що споживаний цими пристроями струм має імпульсний характер з великим відсотком вмісту високих гармонік. Через це можуть виникати проблеми електромагнітної сумісності при роботі різного устаткування. Це також призводить до збільшення реактивної потужності, що генерується в мережу.

В цілях запобігання подібної негативної дії на живлячі мережі в Україні діє стандарт ДСТУ ІЕС 61000-3-2, що визначає норми по гармонійних складових споживаного струму для систем електроживлення потужністю більше 75 Вт і всіх типів освітлювального устаткування. Починаючи з 80-х років минулого століття і до цього дня, ці норми поступово стають більш жорсткими, що викликало необхідність вживання спеціальних заходів і підштовхнуло розробників устаткуван-

ня до розробки різних варіантів схем, що забезпечують підвищення коефіцієнта потужності [5].

Для зменшення негативного впливу перетворювача на живлячу мережу використовуються коректори коефіцієнта потужності (ККП). Існують електронні і неелектронні ККП. Неелектронні ККП широко застосовують електромагнітні компенсатори реактивної потужності - синхронні двигуни, що виробляють в мережу реактивну потужність. Проте такі системи непридатні для побутового споживача. Електронні ККП - система схемотехнічних рішень, покликана збільшити коефіцієнт потужності - є найоптимальнішим рішенням для побутового споживання.

Цілями даної статті є розгляд основних методів корекції коефіцієнта потужності, порівняння аналогових та цифрових систем керування високочастотними пристроями корекції коефіцієнта потужності.

#### Огляд основних методів корекції коефіцієнта потужності

Основне завдання ККП – зведення до нуля запізнювання споживаного струму відносно напруги мережі при збереженні його синусоїдальної форми. Для цього необхідно відбирати від мережі струм не короткими інтервалами, а на всьому періоді роботи. Потужність, що споживається від джерела, повинна залишатися постійною навіть у разі зміни напруги мережі. Це означає, що при зниженні напруги мережі струм навантаження повинен бути збільшений, і навпаки. Для цих цілей придатні перетворювачі з індуктивним накопичувачем і передачею енергії на зворотному ходу.

Методи корекції можна умовно розділити на низькочастотні і високочастотні [6]. Якщо частота роботи коректора набагато вища за частоту живлячої мережі - це високочастотний коректор, інакше - низькочастотний. В схемах з підвищенням напруги, так званих «бустерах», здебільшого використовуються наступні методи високочастотної корекції: метод "граничного" керування, метод керування по піковому значенню струму

та метод керування по середньому значенню струму. Кожен метод має певні переваги і недоліки, що впливають на вибір мікросхеми.

**Метод “граничного” керування**

Даний метод реалізує управління на межі між режимами безперервних і переривчастих струмів. Функціональна електрична схема реалізації даного методу представлена на рис. 1. Вхідна синусоїдальна напруга від живлячої мережі подається на випрямляч VD1 через вхідний фільтр електромагнітних завад (ФЕМЗ), що захищає живлячу мережу від високочастотних за-

вад коректора. Випрямлена напруга через дільник з коефіцієнтом ділення  $\frac{1}{K_D}$  подається на

помножувач, формуючи еталонну напругу  $U_{em}$ . Другий множник визначається сигналом з підсилювача помилки по напрузі (ППН) щодо опорного сигналу  $U_{ref}$ . Еталонна напруга порівнюється компаратором К з напругою, що знімається з датчика струму в ланцюзі витоку ключа Q. Сигнал з компаратора та сигнал з датчика нульового струму (ДНС) дроселя відповідають за перемикання тригера Т, який керує ключем Q [4].

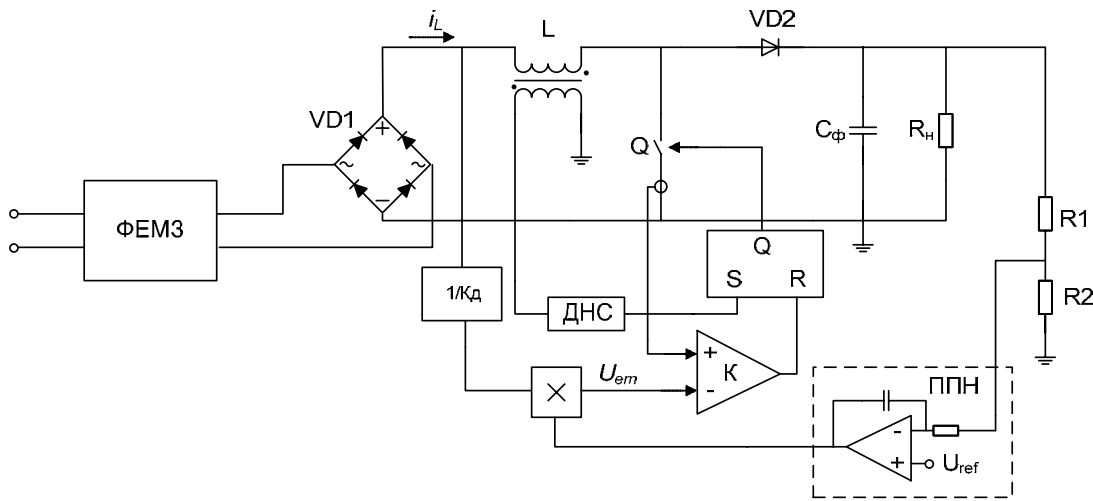


Рис. 1. Схема “граничного” керування

У початковий момент часу струм в дроселі  $i_L$  рівний нулю, ДНС встановлює в одиничний стан тригер і відбувається відкривання ключа Q. Дросель L починає накопичувати електричну енергію, що супроводжується лінійним зростанням його струму. Коли напруга з датчика струму, пропорційна струму дроселя, стає рівною напрузі  $U_{em}$ , відбувається закривання ключа Q. Енергія, накопичена в дроселі, віддається через

відкритий діод VD2 у фільтруючий конденсатор  $C_{\phi}$  та навантаження  $R_{н}$ . Струм в дроселі спадає, напруга з додаткової вторинної обмотки дроселя L використовується датчиком нульової напруги для визначення моменту зниження струму дроселя до нуля. При цьому відбувається відкривання ключа Q, що відповідає початку нового циклу. Часові діаграми струмів, що пояснюють роботу схеми, представлені на рис. 2.

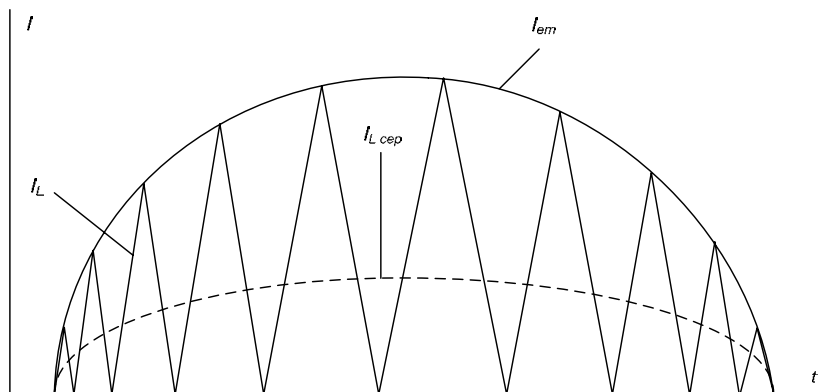


Рис. 2. Діаграми струмів “граничного” керування

Переваги даного методу:

- проста схема управління;
  - «м'які» умови перемикання силового діода VD;
  - малі динамічні втрати при відкритті ключа Q.
- Недоліки:
- зміна частоти перемикання протягом напівперіоду живлячої напруги і її залежність від навантаження і вхідної напруги.

### Метод керування по піковому значенню струму

Функціональна електрична схема системи керування для даного методу представлена на рис. 3.

Відкривання силового ключа здійснюється за сигналом від тактового генератора (ТГ). За за -

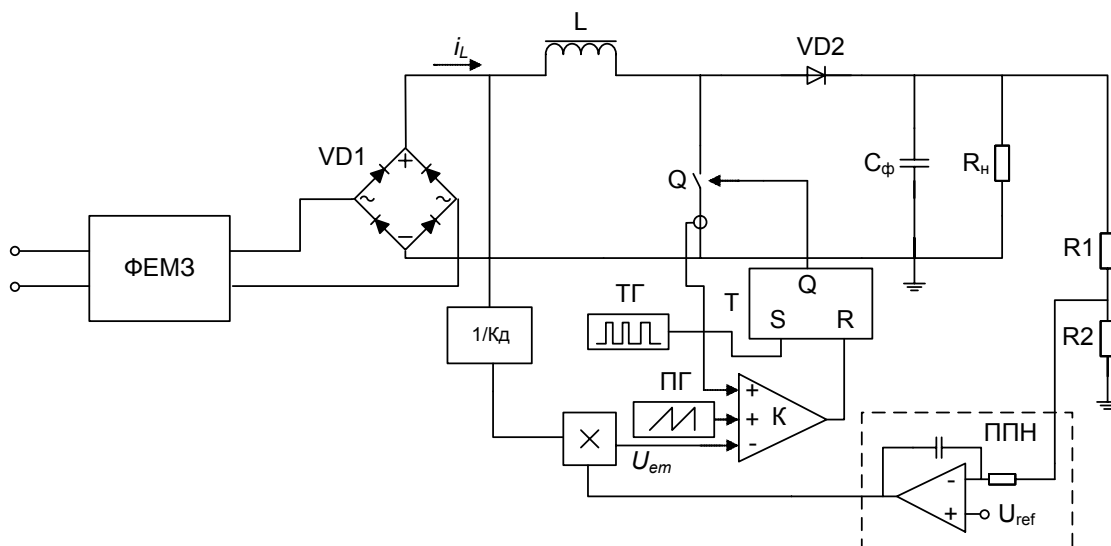


Рис. 3. Схема керування по піковому значенню струму

Недоліки:

- спотворення форми кривої вхідного струму, що зростають при зменшенні навантаження і при збільшенні вхідної напруги;
- чутливість до перешкод, що виникають при комутації;
- жорсткі умови закривання силового діода, що призводять до збільшення динамічних втрат і, як наслідок, до високого рівня високочастотних завад.

кривання ключа відповідає еталонний сигнал, отриманий перемноженням миттєвого значення випрямленої вхідної напруги, що знімається з випрямляча, і напруги ППН. Цей сигнал порівнюється компаратором K з сумою сигналів з датчика струму і з джерела пілкоподібної напруги (ПГ) тієї ж частоти, що і у тактового генератора.

Переваги даного методу:

- постійна частота перемикання;
- режим безрозривних струмів, що супроводжується малими викидами струму при меншому його середньоквадратичному значенні, що дозволяє застосовувати малогабаритний вхідний фільтр;
- необхідність тільки одного датчика струму, що дозволяє обмежити пікове значення струму в дроселі в межах кожного такту.

### Метод керування по середньому значенню струму

Функціональна електрична схема ККП представлена на рис. 4 [4]. Керуючий сигнал формується підсилювачем помилки по струму (ППС), який порівнює сигнал з датчика струму з добутком миттєвого значення випрямленої вхідної напруги, що знімається з випрямляча, і напруги ППН. Сигнал керування подається на широтно-імпульсний модулятор, який представляє собою компаратор K. Компаратор порівнює сигнал керування з сигналом, що надходить з генератора пілкоподібної напруги (ПГ).

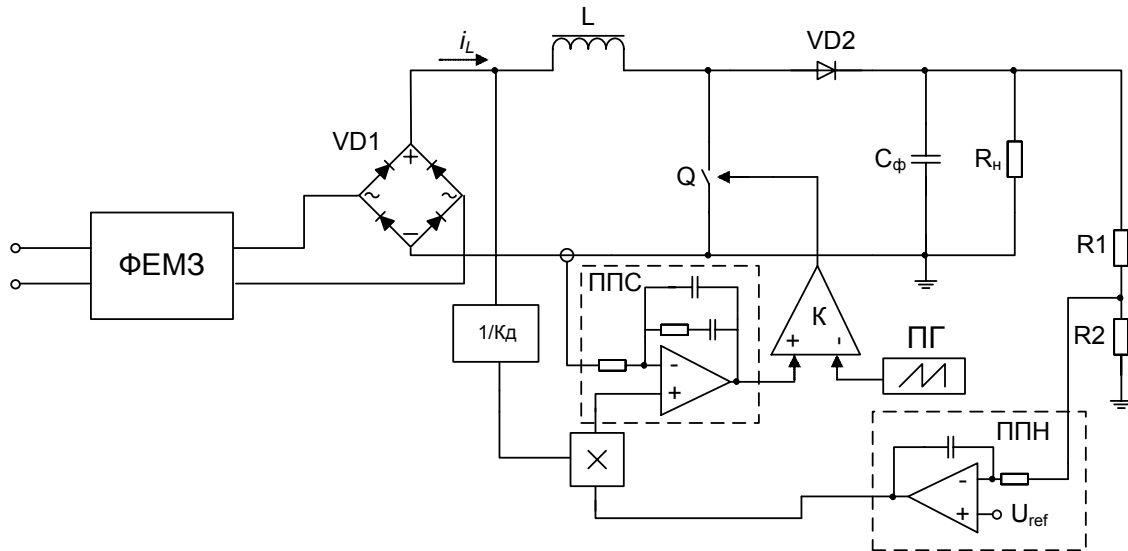


Рис. 4. Схема керування по середньому значенню струму

Переваги методу:

- постійна частота перемикання;
- режим безрозривних струмів;
- стійкість до комутаційних перешкод.

Недоліки методу:

- відносно складна схема управління, що вимагає включення датчика струму в ланцюг дроселя і наявності інверсного входу;
- жорсткі умови закривання силового діода.

### Цифрові системи керування ККП

Цифрове керування імпульсними джерелами живлення стає все більш поширеним не тільки в потужних низькочастотних джерелах, а й у високочастотних виконаннях низької та середньої потужності, включаючи DC/DC перетворювачі і однофазні випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності [2].

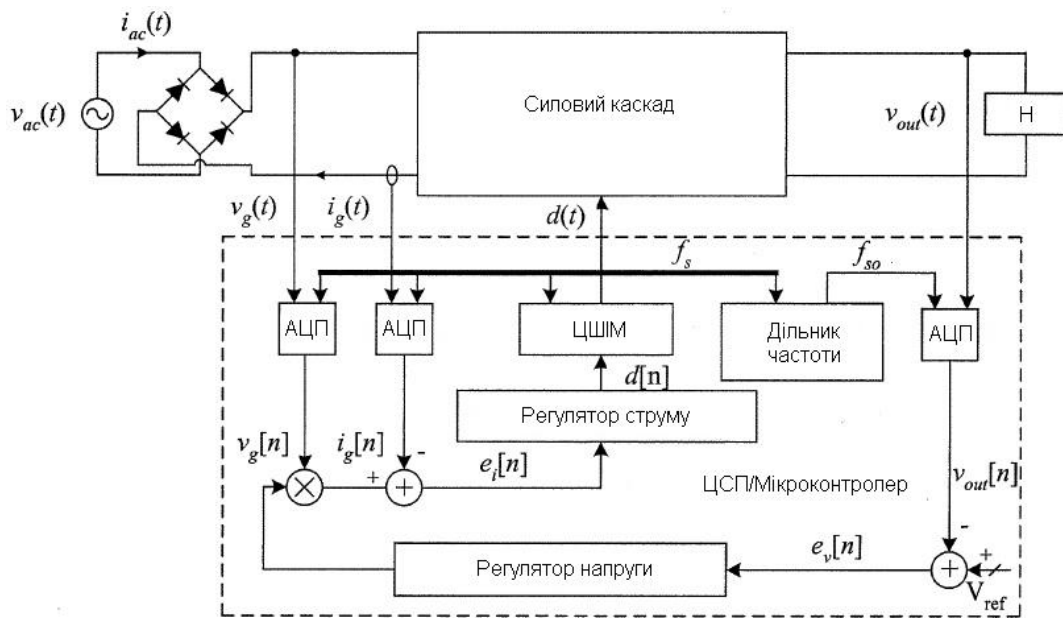


Рис. 5. Функціональна схема ККП з цифровою системою керування, де  $v_{ac}(t)$ ,  $i_{ac}(t)$  - вхідна напруга та струм,  $v_g(t)$ ,  $i_g(t)$  - напруга та струм на виході випрямляча,  $v_{out}(t)$  - вихідна напруга,  $i_g[n]$ ,  $v_g[n]$ ,  $v_{out}[n]$  - дискретні значення вхідного струму, вхідної та вихідної напруги,  $V_{ref}$  - опорна напруга,  $e_v[n]$ ,  $e_i[n]$  - сигнали помилки по напрузі та струму,  $d[n]$ ,  $d(t)$  - дискретний та неперервний сигнал керування,  $f_s$ ,  $f_{so}$  - тактові частоти

На рис. 5 представлена функціональна схема коректора коефіцієнта потужності з цифровою системою керування [1]. Система керування може бути виконана на основі цифрового сигнального процесора (ЦСП) або мікроконтролера.

Імпульсний перетворювач контролюється двома контурами: регулятором струму та регулятором напруги. Регулятор струму побудований так, щоб вхідний струм перетворювача повторював форму вхідної напруги. В ідеальному випадку ці два сигнали мають однакову форму і знаходяться у фазі: таким чином випрямляч представляє собою активне навантаження. Регулятор напруги стабілізує напругу на навантаженні (Н). Цифровий широтно-імпульсний модулятор (ЦШІМ) керує ключем силового каскаду. Дискретні значення вхідного струму  $i_g[n]$ , вхідної  $v_g[n]$  та вихідної  $v_{out}[n]$  напруги отримуються за рахунок аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП).

Цифрове керування має наступні переваги: менша кількість дискретних компонентів, відсутність залежності від старіння компонентів, вища гнучкість та швидкий час виходу на ринок. Тому, цифрове керування перетворювачами потужності отримує все більше і більше уваги при дослідженнях і промислового застосуванні [3].

Можна припустити, що в подальшому відбудеться відмова від аналогових методів корекції коефіцієнта потужності та перехід до цифрових. А тому необхідно приділити більше уваги саме цифровим системам корекції коефіцієнта потужності.

## Висновки

Приведені функціональні електричні схеми для методу "граничного" керування, методу керування по піковому значенню струму та методу керування по середньому значенню струму. Проаналізовано основні переваги та недоліки кожного методу. Серед аналогових методів керування найкращими характеристиками володіє метод керування по середньому значенню струму. Форма вхідного струму в даному випадку

найменш відрізняється від форми синусоїдального сигналу. Проте недоліком такого методу є більш складна схема керування. Простішу схему керування має "граничний" метод, але форма вхідного струму при цьому значно відрізняється від синусоїди.

Представлена функціональна схема для коректора коефіцієнта потужності з цифровою системою керування та вказані такі переваги цифрових систем керування над аналоговими, як менша кількість дискретних компонентів, відсутність залежності від старіння компонентів, вища гнучкість та швидкий час виходу на ринок.

## Список використаних джерел

1. *Chen J.* Predictive digital current programmed control / J. Chen, A. Prodic, R.W. Erickson, D. Maksimovic // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, No. 1, January 2003. – P. 411-419.
2. *Prodic A.* Dead-zone digital controllers for improved dynamic response of low harmonic rectifiers / A. Prodic, D. Maksimovic, R. W. Erickson // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 1, January 2006. – P. 173-181.
3. *Yeh C.-A.* Digital-Controlled Power Factor Corrector with Transition Current Mode Control without Zero Current Detection / C.-A. Yeh, K.-M. Ho, Y.-S. Lai, F. Takahashi, M. Hamaogi // The Eighth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Taipei, Taiwan, November 2-5, 2009. – P. 198-203.
4. *Васильев А.О.* Анализ современных методов и технических средств коррекции коэффициента мощности у импульсных устройств / А.О. Васильев, В.Ф. Худяков, В.А. Хабузов // Силовая электроника № 2, 2004. – С. 72-77.
5. *Еськин Д.* Контроллеры корректоров коэффициента мощности L656X / Д. Еськин // Новости электроники № 3, 2009. – С. 17-20.
6. *Климов В.П.* Схемотехника однофазных корректоров коэффициента мощности / В.П. Климов, В.И. Федосеев // Практическая силовая электроника № 8, 2002.

Поступила в редакцию 23 декабря 2013 г.

УДК 621.314

**Ю.С. Демченко, В.В. Рогаль**, канд. техн. наукНациональный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",  
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

## Методы коррекции коэффициента мощности

В данной статье показана возможность возникновения проблем электромагнитной совместимости при работе различного оборудования и обоснована необходимость использования корректоров коэффициента мощности для уменьшения негативного влияния потребителей электроэнергии на питающую сеть. Рассмотрены основные методы коррекции коэффициента мощности. Проведено сравнение методов управления высокочастотными устройствами коррекции коэффициента мощности, для каждого метода приведена функциональная электрическая схема. Указаны преимущества цифровых систем управления над аналоговыми. Сделан прогноз о возможном в будущем переходе к цифровым системам коррекции коэффициента мощности. Библи. 6, рис. 5.

**Ключевые слова:** коэффициент мощности, корректор коэффициента мощности, электромагнитная совместимость, метод управления, цифровое управление.

UDC 621.314

**Yu.S. Demchenko, V.V. Rohal**, Ph.D.National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",  
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

## Methods of power factor correction

This paper shows the possibility of electromagnetic compatibility problems when using different equipment and justifies the necessity of usage of power factor correctors to reduce the negative impact on mains by electricity consumers. The basic methods of correcting the power factor are considered. Comparison of the methods of control for high-frequency power factor correction devices is carried out, for each method the functional electrical scheme is shown. The advantages of digital control systems over analog are specified. The forecast of a possible future transition to digital power factor correction systems is made. Reference 6, figures 5.

**Keywords:** power factor, power factor corrector, electromagnetic compatibility, control method, digital control.

### References

1. Chen J., Prodic A., Erickson R.W., Maksimovic D. (2003), "Predictive digital current programmed control". IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 18, no. 1, pp. 411-419.
2. Prodic A., Maksimovic D., Erickson R.W. (2006), "Dead-zone digital controllers for improved dynamic response of low harmonic rectifiers". IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 21, no. 1, pp. 173-181.
3. Yeh C.-A., Ho K.-M., Lai Y.-S., Takahashi F., Hamaogi M. (2009), "Digital-Controlled Power Factor Corrector with Transition Current Mode Control without Zero Current Detection". The Eighth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Taipei, Taiwan, pp. 198-203.
4. Vasilev A.O., Khudiakov V.F., Khabuzov V.A. (2004), "Analysis of modern methods and technical means of correction of power-factor at the impulsive power supplies". Silovaia elektronika № 2, pp. 72-77. (Rus)
5. Yeskin D. (2009), "Controllers of power factor correctors L656X". Novosti elektroniki №3, pp. 17-20. (Rus)
6. Klimov V.P., Fedoseev V. I. (2002), "Circuitry of single-phase power factor correctors". Prakticheskaia silovaia elektronika № 8. (Rus)