

СПОСОБИ ПОКРАЩЕННЯ СПЕКТРУ ВХІДНОГО СТРУМУ КОРЕКТОРА КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ

В.В. Рогаль, канд.техн.наук, **Ю.С. Демченко**
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
 пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.
 e-mail: y.demchenko@fel.kpi.ua

У роботі вказано на негативний вплив вищих гармонік струму на мережу живлення та обладнання, що підключене до неї. Проведено дослідження роботи активного високочастотного коректора коефіцієнта потужності з керуванням по піковому струму. У середовищі MATLAB/Simulink створено модель даного коректора. Наведено діаграми вхідного струму коректора та його спектру. Виявлено, що в спектрі вхідного струму величина третьої гармоніки є достатньо значною, та вказано причину виникнення даної гармоніки. Запропоновано способи покращення спектру вхідного струму коректора та проведено їхній порівняльний аналіз.

Бібл. 8, рис. 7.

Ключові слова: коректор коефіцієнта потужності, гармоніки струму, керування по піковому струму, спектр, коефіцієнт сумарних гармонічних спотворень.

Вступ. Сьогодні велика кількість навантажень, що підключаються до мережі живлення, споживає струм, який суттєво відрізняється від синусоїдального. Це призводить до того, що в мережу генерується значна кількість вищих гармонік струму. Найпоширенішими джерелами вищих гармонік у системах електроживлення є випрямлячі, джерела безперебійного живлення, тиристорні системи, імпульсні джерела живлення, частотні приводи змінного струму, зварювальні апарати, освітлювальна апаратура та дугові плавильні печі [4]. Причому сумарна потужність нелінійних навантажень може становити 60–80 % від потужності всіх споживачів електромережі [5].

Вищі гармоніки струму можуть викликати різні негативні наслідки [2]: резонансні явища в елементах мережі, перегрів та обрив нульового проводу за рахунок гармонік кратних трьом, зменшення активної потужності мережі, спотворення синусоїдальності напруги живлення, додаткові втрати в трансформаторах та інше. Із сказаного вище стає очевидним, що усунення вищих гармонік струму в мережі живлення є дуже актуальною проблемою.

Для зменшення величини вищих гармонік струму, що генеруються в мережу, широко використовуються коректори коефіцієнта потужності (ККП). На вході імпульсних джерел живлення потужністю до кількох кіловат здебільшого встановлюються активні високочастотні коректори, побудовані на основі підвищувачого широтно-імпульсного перетворювача. Існують різні методи керування такими коректорами [3]. Якщо потужність джерела живлення не перевищує 200–300 Вт, то коректор зазвичай працює в режимі переривчастого струму, інакше – в режимі безперервного струму [6].

Метою роботи є дослідження коректора коефіцієнта потужності з керуванням по піковому струму та аналіз способів покращення спектру вхідного струму даного коректора.

Керування по піковому струму. Схема коректора коефіцієнта потужності з керуванням по піковому струму показана на рис. 1. Відкриття силового ключа Q здійснюється за сигналом від тактового генератора (ТГ). За закривання ключа відповідає еталонний сигнал I_{em} , отриманий перемноженням миттєвого значення випрямленої вхідної напруги, що знімається з випрямляча, і сигналу з виходу підсилювача помилки по нарузі (ППН). Цей сигнал порівнюється ком-

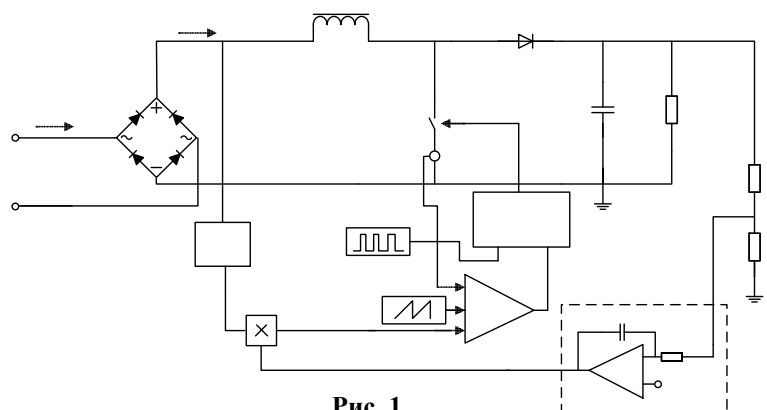


Рис. 1

паратором К з сумою сигналів з датчика струму і з джерела пилкоподібної напруги (ПГ) тієї самої частоти, що і у тактового генератора [1, 7]. Тобто еталонний сигнал обмежує величину, до якої відбувається наростання струму в ключі.

У середовищі Simulink пакету MATLAB була розроблена модель ККП із керуванням по піковому струму. Потужність коректора становить 500 Вт, робоча частота – 50 кГц. Величина індуктивності L становить 2 мГн, ємності C – 300 мкФ, опору навантаження R_n – 320 Ом. Вихідна напруга коректора стабілізується на рівні 400 В.

На рис. 2 показано вхідний струм I_{in} коректора та його спектр. Із вказаного рисунка видно, що в спектрі вхідного струму ККП достатньо суттєвою є третя гармоніка, величина якої становить 25% від основної, а коефіцієнт сумарних гармонічних спотворень струму (THD) дорівнює 25,73%.

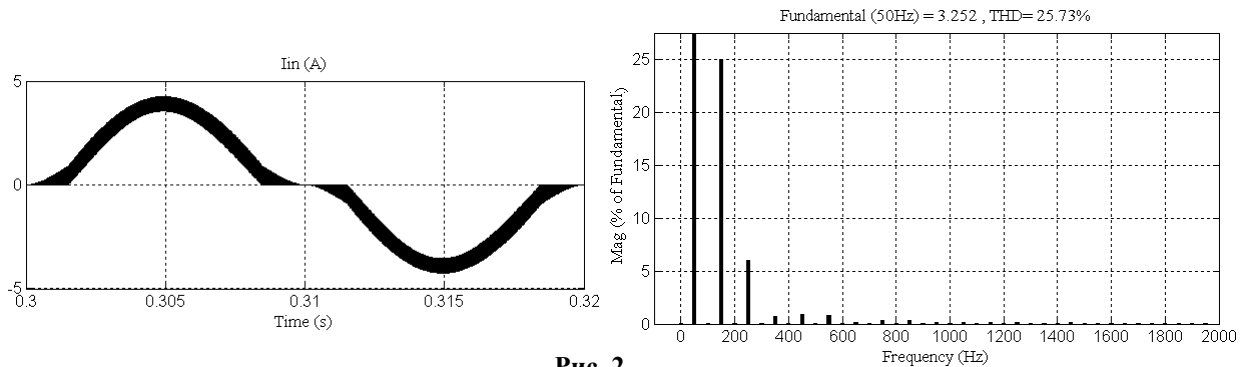


Рис. 2

Такий великий вміст третьої гармоніки пояснюється тим, що у середнього вхідного струму коректора при даному методі керування в області нуля з'являється полиця струму. Саме це і призводить до виникнення третьої гармоніки. Отже, для покращення спектру вхідного струму необхідно зменшити вказану нульову полицю.

Способи покращення спектру вхідного струму. Середній вхідний струм коректора з керуванням по піковому струму визначається наступним виразом [8]:

$$i_{сеп}(t) = A \sin \omega t + B \sin^2 \omega t - C,$$

де $A = \frac{V_p V_e}{k} + \frac{V_p S_e T_s}{V_o} - \frac{V_p T_s}{2L}$, $B = \frac{V_p^2 T_s}{2LV_o}$, $C = S_e T_s$, V_p – амплітуда вхідної напруги, V_e – сигнал з виходу

ППН, k – коефіцієнт ділення вхідної напруги, S_e – нахил пилкоподібної напруги, T_s – період комутації, V_o – вихідна напруга.

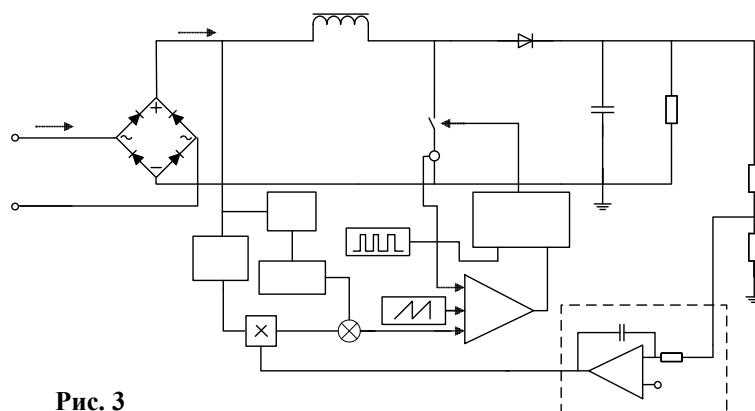


Рис. 3

Із наведеного виразу видно, що середній струм $I_{сеп}$ крім синусоїдальної компоненти має у своєму складі також компоненту, пропорційну квадрату синусоїди, та постійну складову. Саме наявність постійної складової і спричиняє вказану вище нульову полицю струму. Отже, необхідно підняти величину еталонного сигналу в області нуля на величину постійної складової $S_e T_s$. Для цього була розроблена схема ККП із коригуванням еталонного сигналу по похідній (рис. 3). Випрямлена вхідна

напруга коректора з коефіцієнтом ділення $k2$ подається на диференціюючу ланку, модуль вихідного сигналу якої додається до сигналу з виходу перемножувача. Коригуючий вплив при цьому

описується виразом $i_{кор}(t) = C|\cos\omega t|$ та збільшує еталонний сигнал в області, близькій до нуля, амплітуда ж сигналу майже не змінюється. Величина C обирається близькою до значення $S_e T_s$.

На рис. 4 показано вхідний струм I_{in} та його спектр для запропонованого коректора. Із вказаного рисунка видно, що величина третьої гармоніки становить близько 3,5% від основної. Коефіцієнт сумарних гармонічних спотворень струму зменшився більш ніж в чотири рази і дорівнює 5,33%. Отже, розроблений метод керування дозволяє суттєво покращити спектр вхідного струму коректора коефіцієнта потужності.

Подальшого покращення спектру вхідного струму можна досягнути за рахунок введення коригуючого впливу $i_{кор}(t) = C - B\sin^2\omega t$. Даний підхід дозволяє отримати майже синусоїдальний вхідний струм з коефіцієнтом гармонічних спотворень 1,53% (рис. 5).

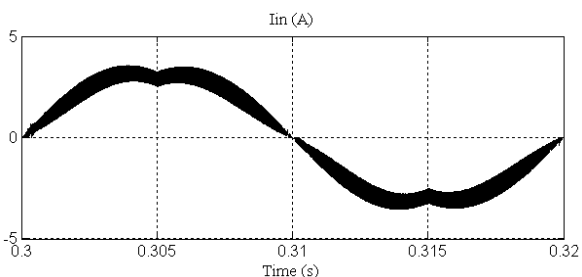


Рис. 4

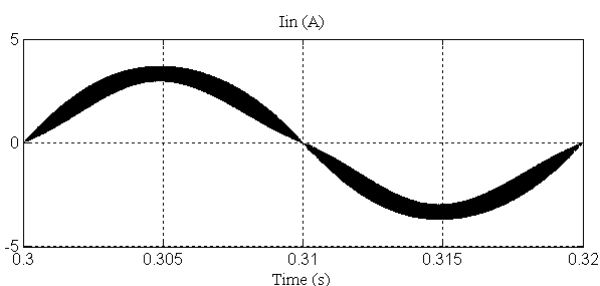
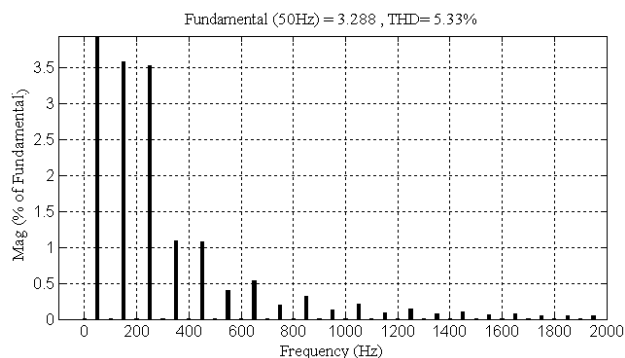
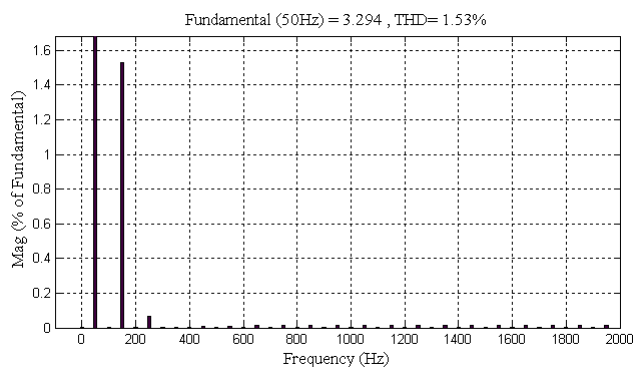


Рис. 5



На рис. 6 представлено коригуючі сигнали $C|\cos\omega t|$ (крива 1), $C - B\sin^2\omega t$ (крива 2) та ідеальну синусоїду (крива 3), де $C = S_e T_s = 1,8$; $B = \frac{V^2 T_s}{2LV_0} = 1,2$. З рис. 6 видно, що коригуючі сигнали формуються за схожим принципом – мають максимальне значення при переході синусоїди через нуль та мінімальне – при максимальному значенні синусоїди.

Третім способом покращення спектру вхідного струму коректора коефіцієнта потужності є підмішування в еталонний сигнал постійної складової величиною $S_e T_s$. Результат такого підмішування зображено на рис. 7. Коефіцієнт сумарних гармонічних спотворень струму при цьому становить 7,43%.

Очевидно, що з трьох розглянутих способів найкращий результат забезпечує коригуючий вплив $C - B\sin^2\omega t$. Проте недоліком такого підходу є його складність. Простішим варіантом є введення коригуючого впливу $C|\cos\omega t|$. Отримане значення THD при цьому є дещо вищим, але цілком задовольняє вимогам існуючих стандартів. Підмішування постійної складової є найпростішим способом із трьох розглянутих, однак він дає най-

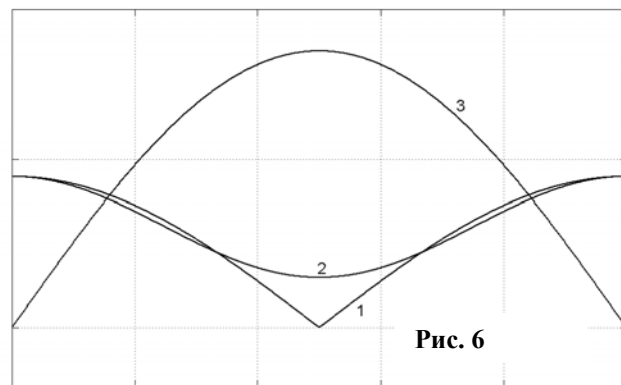


Рис. 6

гірший результат. Подальше покращення спектру вхідного струму коректора може бути досягнуто за рахунок більш складних методів формування еталонного сигналу, але це призводить до здорожчання системи керування та може виявитися неефективним.

Висновки.

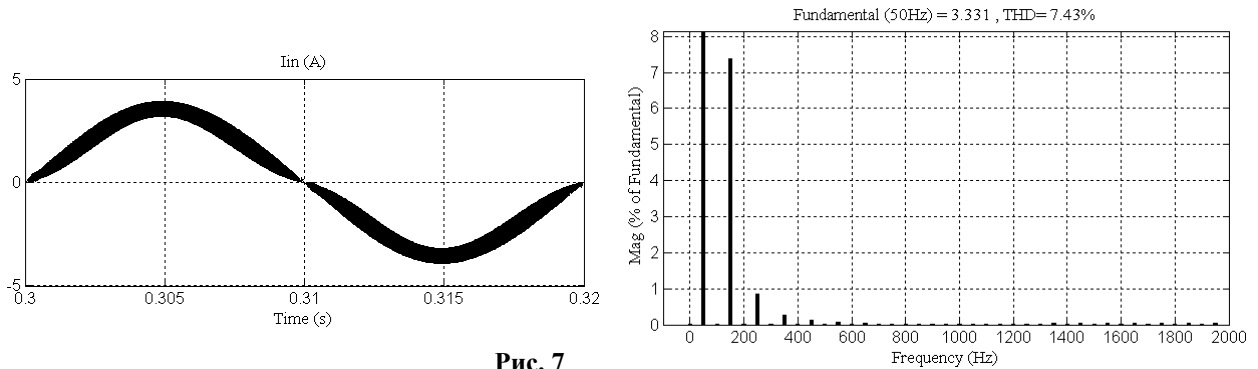


Рис. 7

1. Проведено дослідження роботи активного височастотного коректора коефіцієнта потужності із керуванням по піковому струму.
2. Виявлено, що в спектрі вхідного струму коректора вміст третьої гармоніки є достатньо великим. Дана гармоніка з'являється внаслідок того, що при піковому методі керування середній струм коректора має полицю в області переходу через нуль.
3. Розглянуто способи покращення спектру вхідного струму коректора. Виявлено, що найкращий результат забезпечує коригуючий вплив $C - B\sin^2\omega t$. Проте недоліком такого підходу є його складність. Введення похідної є простішим варіантом та дозволяє отримати вхідний струм, спектр якого цілком задовольняє вимогам існуючих стандартів. Підмішування постійної складової є найпростішим способом, але дає найгірший результат.

1. Васильев А.О., Худяков В.Ф., Хабузов В.А. Анализ современных методов и технических средств коррекции коэффициента мощности у импульсных устройств // Силовая электроника. – 2004. – № 2. – С. 72–77.
2. Григорьев О., Петухов В., Соколов В., Красилов И. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники. – 2002. – № 6. – С. 18–19.
3. Демченко Ю.С., Рогаль В.В. Методы коррекции коэффициента мощности // Электроника та зв'язок. – 2013. – № 6. – С. 24–29.
4. Кобелев А.В., Зыбин А.А. Современные проблемы высших гармоник в городских системах электроснабжения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Том 17. – № 1. – С. 187–191.
5. Кобелев А.В., Кочергин С.В., Бакулин А.В., Хребтов Н.А., Павлинов В.В. Анализ высших гармоник напряжения и тока при использовании компактных люминесцентных ламп // Вопросы современной науки и практики. – 2011. – № 3. – С. 374–377.
6. Power Factor Correction (PFC) Handbook. Choosing the Right Power Factor Controller Solution // ON Semiconductor. – 2014. – 128 p. Available at: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/HBD853-D.PDF>
7. Rossetto L., Spiazzi G., Tenti P. Control Techniques for Power Factor Correction Converters // Proceedings of Power Electronics, Motion Control Conference (PEMC), Warsaw, Poland, September 1994. – Pp. 1310–1318.
8. Zhou C., Jovanovic M.M. Design trade-offs in continuous current-mode controlled boost power-factor-correction circuit // Proceeding of The High Frequency Power Conversion Conference (HFPC), San Diego, California, May, 1992. – Pp. 209–219.

УДК 621.314

СПОСОБИ УЛУЧШЕНИЯ СПЕКТРА ВХОДНОГО ТОКА КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

В.В. Рогаль, канд.техн.наук, **Ю.С. Демченко**
Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.
e-mail: y.demchenko@fel.kpi.ua

В работе указано негативное влияние высших гармоник тока на питающую сеть и оборудование, подключенное к ней. Проведено исследование работы активного высокочастотного корректора коэффициента мощности с управлением по пиковому току. В среде MATLAB/Simulink создана модель данного корректора. Приведены диаграммы входного тока корректора и его спектра. Обнаружено, что в спектре входного тока величина третьей гармоники достаточно значительная, указана причина возникновения данной гармоники. Предложены способы улучшения спектра входного тока корректора и проведен их сравнительный анализ.

Библ. 8, рис. 7.

Ключевые слова: корректор коэффициента мощности, гармоники тока, управление по пиковому току, спектр, коэффициент суммарных гармонических искажений.

METHODS OF POWER FACTOR CORRECTOR INPUT CURRENT SPECTRUM IMPROVEMENT

V.V. Rohal, Yu.S. Demchenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.
e-mail: y.demchenko@fel.kpi.ua

The paper shows the negative impact of high current harmonics on the mains supply and the equipment connected to it. The investigation of the performance of the active high-frequency power factor corrector with peak current control method is conducted. In the MATLAB/Simulink environment the model of this corrector is built. The diagrams of the corrector's input current and its spectrum are given. It was discovered that the value of the third harmonic in the input current spectrum is quite significant. The reason of the appearance of this harmonic is indicated. Methods of power factor corrector input current spectrum improvement are offered and their comparative analysis is conducted. References 8, figures 7.

Key words: power factor corrector, current harmonics, peak current control method, spectrum, total harmonic distortion.

1. *Vasiliev A.O., Khudiakov V.F., Khabuzov V.A.* Analysis of modern methods and technical means of correction of power-factor at the impulsive power supplies // *Silovaia Elektronika*. – 2004. – No 2. – Pp. 72–77. (Rus)
2. *Grigoriev O., Petukhov V., Sokolov V., Krasilov I.* High harmonics in the power networks of 0.4 kV // *Novosti Elektrotehniki*. – 2002. – No 6. – Pp. 18–19. (Rus)
3. *Demchenko Yu.S., Rohal V.V.* Methods of power factor correction // *Elektronika ta Zv'iazok*. – 2013. – No 6. – Pp. 24–29. (Ukr)
4. *Kobelev A.V., Zybin A.A.* Modern problems of high harmonics in the urban supply systems // *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – 2011. – Vol. 17. – No 1. – Pp. 187–191. (Rus)
5. *Kobelev A.V., Kochergin S.V., Bakulin A.V., Khrebtov N.A., Pavlinov V.V.* The analysis of high voltage and current harmonics when using compact fluorescent lamps // *Voprosy Sovremennoi Nauki i Praktiki*. – 2011. – No 3. – Pp. 374–377. (Rus)
6. *Power Factor Correction (PFC) Handbook. Choosing the Right Power Factor Controller Solution* // ON Semiconductor. – 2014. – 128 p. Available at: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/HBD853-D.PDF>
7. *Rossetto L., Spiazzi G., Tenti P.* Control Techniques for Power Factor Correction Converters // *Proceedings of Power Electronics, Motion Control Conference (PEMC), Warsaw, Poland, September 1994*. – Pp. 1310–1318.
8. *Zhou C, Jovanovic M.M.* Design trade-offs in continuous current-mode controlled boost power-factor-correction circuit // *Proceeding of The High Frequency Power Conversion Conference (HFPC), San Diego, California, May 1992*. – Pp. 209–219.

Надійшла 21.04.2015

Остаточний варіант 13.08.2015