

М. Й. Бурбело<sup>1</sup>  
Ю. В. Лобода<sup>1</sup>  
Д. Ю. Лебедь<sup>1</sup>

## СИСТЕМА ПРЯМОГО КЕРУВАННЯ СТРУМОМ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

Основним напрямком дослідження є оптимізація роботи активного фільтра, спрощення системи керування та виявлення нових алгоритмів розрахунку компенсувальних струмів. Удосконалено систему прямого керування струмом активного фільтра з формуванням синусоїдних сигналів, що дорівнюють основній гармоніці фазних струмів навантаження, а також несинусоїдних несиметричних сигналів, як різниці вхідних фазних струмів навантаження і основної гармоніки, для фільтрування вищих гармонік та симетрування струмів навантаження, що дозволяє забезпечити розділення контурів фільтрування вищих гармонік та симетрування нелінійних несиметричних навантажень. Система керування, яка складається з двох блоків: блока формування струму компенсації вищих гармонік і блока перетворення струмів з системи фазних координат в систему координат миттєвих симетричних складових, — забезпечує практично повну компенсацію лінійних та нелінійних спотворень. У разі використання одного блока перетворення струмів з системи фазних координат в систему координат миттєвих симетричних складових, що істотно спрощує реалізацію системи керування, забезпечується достатня для масових споживачів якість компенсації вищих гармонік (забезпечується компенсація третьої, п'ятої, сьомої та дев'ятої гармонік струму, а рівень некомпенсованих вищих гармонік визначається одинадцятю та тринадцятю гармоніками, вміст яких суттєво нижчий) і повне симетрування навантажень. Показано, що систему прямого керування струмом активного фільтра у разі використання вектора фазних струмів і вектора фазних напруг можна застосовувати і для повної компенсації реактивної потужності. У цьому випадку відбувається незначне початкове пере-регулювання реактивної потужності, яке автоматично компенсується. Регулювання реактивної потужності здійснюється опосередковано контуром підтримки напруги на конденсаторі інвертора напруги активного фільтра.

**Ключові слова:** електричні мережі, несиметричні несинусоїдні режими, симетричні складові, вищі гармоніки, активний фільтр, система керування.

### Вступ

На сьогодні проблема якості електричної енергії в розподільних електричних мережах є однією з найактуальніших. На більшості сучасних підприємств використовується електрообладнання, яке знижує якість електричної енергії. До нього відносяться: випрямлячі, які спотворюють синусоїдність форми струму та напруги; потужні однофазні електроприймачі, що спричиняють виникнення несиметрії навантажень. Ці фактори призводять до зниження якості електроенергії і, як наслідок — передчасного виходу з ладу технологічного обладнання, а також до збільшення втрат електричної енергії в електричних мережах.

Одним з перспективних засобів компенсації спотворень в електричних мережах є силові активні фільтри (САФ). Методи керування САФ можуть бути розділені на дві групи: методи з проміжним перетворенням миттєвих фазних напруг і струмів в напруги і струми в системі  $dq$ -координат або в миттєві потужності в системі  $pq$ -координатах [1]—[4] та методи з пропорційно-векторним формуванням струмів [5]—[10]. Недоліком таких систем керування є складність їх реалізації та неможливість розділення контурів компенсації гармонічних спотворень, симетрування струмів та компенсації реактивної потужності.

Серед методів керування з пропорційно-векторним формуванням струмів одним з найпростіших є метод прямого керування струмом САФ [11], який забезпечує достатньо високу якість філь-

травання вищих гармонік і симетрування навантажень в усталених і перехідних режимах. Водночас компенсація реактивної потужності не знаходить простого вирішення в рамках реалізації цього методу.

Метою роботи є вдосконалення системи прямого керування струмом силового активного фільтра за рахунок розділення контурів компенсації гармонічних спотворень, симетрування струмів та компенсації реактивної потужності.

### Результати дослідження

В основу методу прямого керування струмом САФ покладено використання миттєвих струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей. Для отримання миттєвих струмів прямої та зворотної послідовностей відносно фази  $A$  використані лінійні перетворення миттєвих синусоїдних струмів [12]

$$i_1(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_\alpha(t) - i'_\beta(t)); \quad (1)$$

$$i_2(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_\alpha(t) + i'_\beta(t)), \quad (2)$$

де  $i_\alpha(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(2i_A(t) - i_B(t) - i_C(t))$ ,  $i'_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}(i'_B(t) - i'_C(t))$  — миттєві струми в системі  $\alpha\beta$ -координат, штрихом позначено затримку сигналів на чверть періоду.

Структурна схема системи керування САФ на основі прямого формування струмів для компенсації вищих гармонік та симетрування струмів навантаження зображена на рис. 1. Система керування складається з двох блоків: блока формування струму компенсації вищих гармонік і блока перетворення струмів з системи фазних координат в систему координат миттєвих симетричних складових ПК 1-3 « $abc/1,2,0$ ».

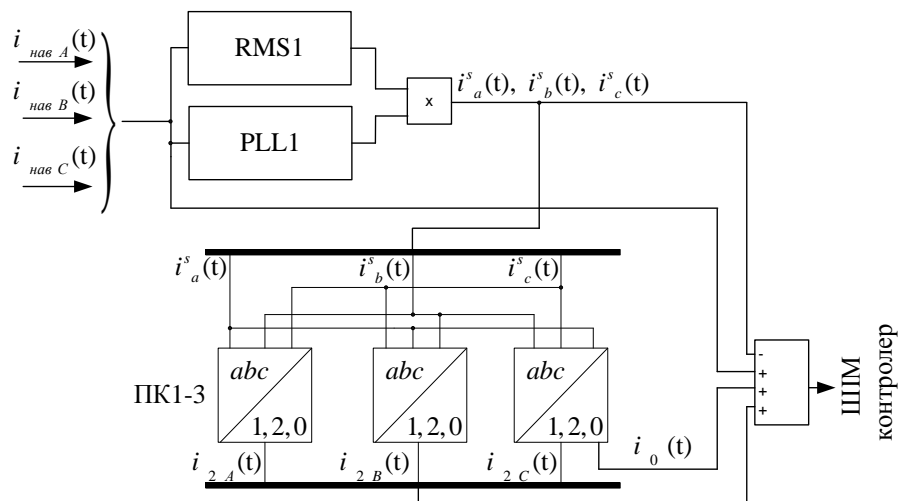


Рис. 1. Система прямого керування струмом САФ для компенсації вищих гармонік та симетрування струмів навантаження

Блок формування струму компенсації вищих гармонік містить: RMS1 — блок трьох однофазних перетворювачів ефективних значень, PLL1 — блок трьох однофазних фазових автоналаджувачів частоти; блок трьох помножувачів і трьох пристроїв віднімання. На виході фазового автоналаджувача частоти PLL1 формується синусоїдний сигнал, який синфазний до відповідного фазного струму навантаження, наприклад, для фази  $A$ , у вигляді  $\sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_A - \phi_A)$ , де  $\psi_A$  — початкова фаза напруги,  $\phi_A$  — фазовий зсув струму відносно напруги фази  $A$ , блок RMS1, який формує діюче значення несинусоїдного струму фази  $|I_A|$ . Перемноження цих величин забезпечує формування синусоїдних сигналів, що практично дорівнюють основній гармоніці несинусоїдних фазних струмів навантаження  $i_a^s(t)$ ,  $i_b^s(t)$ ,  $i_c^s(t)$ . На виході пристроїв віднімання формуються струми компенсації

вищих гармонік кожної фази, які подаються на ШІМ-регулятор інвертора напруги САФ.

Проміжні сигнали з виходу помножувачів, пропорційних основній гармоніці фазних струмів навантаження, подаються на блок перетворювачів координат « $abc/1,2,0$ » зі зміною чергування фаз для знаходження струмів зворотної послідовності відносно різних фаз. Отримані сигнали зворотної та нульової послідовності, які забезпечують симетрування струмів навантаження, підсумовуються з відповідними сигналами компенсації вищих гармонік.

Для моделювання роботи САФ в режимі компенсації вищих гармонік та симетрування навантаження в середовищі *Simulink* пакета прикладних програм *Matlab* використана модель з трифазним нелінійним навантаженням і додатковим однофазним навантаженням. Характеристика елементів дослідної моделі: опір системи живлення  $18,4 + j17,1$  мОм, опір на стороні постійного струму нелінійного навантаження (випрямляч, схема Ларіонова) — 12 Ом, опір симетричного трифазного навантаження —  $10 + j5$  Ом, опір однофазного навантаження (фаза А) —  $3 + j3$  Ом. Результати моделювання показані на рис. 2 і в табл. 1. Накид однофазного навантаження відбувається в момент часу 0,08 с, а скид — в момент часу 0,16 с.

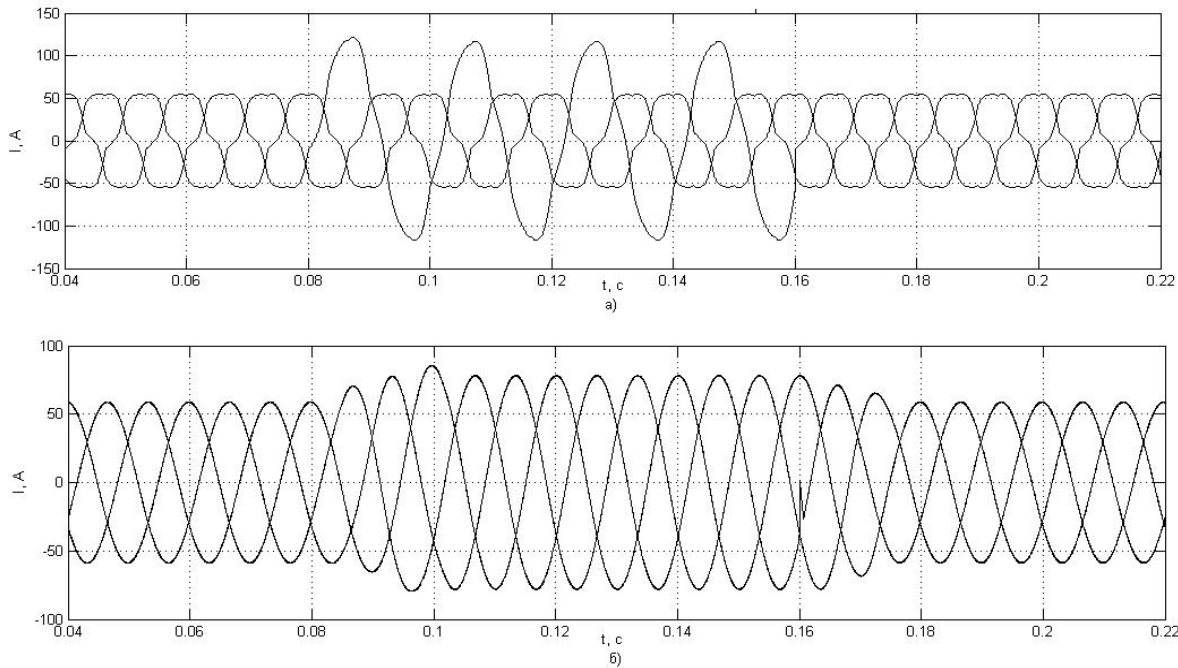


Рис. 2: а — струми навантаження; б — струми мережі за несинусоїдності та несиметрії під час роботи САФ з прямим керуванням струмом

Таблиця 1

Результати моделювання САФ за несинусоїдності та несиметрії

Значення фізичних величин для несиметричного режиму	$I_A$	$I_B$	$I_C$
Амплітудні комплексні значення струмів навантаження ( $I_L$ , А)	$118,0 e^{-j34,6}$	$58,1 e^{j216,8}$	$58,1 e^{j96,8}$
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів навантаження ( $THD_L$ , %)	5,77	11,75	11,75
Амплітудні комплексні значення струмів мережі ( $I_S$ , А)	$78,0 e^{-j32,4}$	$78,0 e^{j207,5}$	$78,0 e^{j87,5}$
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів мережі ( $THD_I$ , %)	0,24	0,25	0,23

У разі невисоких вимог до якості фільтрування вищих гармонік блок формування струму компенсації вищих гармонік можна виключити зі схеми, оскільки блок перетворення струмів з системи фазних координат в систему координат миттєвих симетричних складових « $a, b, c/1,2,0$ », реалізований за формулами (1), (2), забезпечує компенсацію третьої, п'ятої, сьомої та дев'ятої гармонік струму. Рівень некомпенсованих вищих гармонік визначається одинадцятю та тринадцятю гармоніками, вміст яких суттєво нижчий. Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів мережі за використання цього алгоритму становить  $THD_I = 1,41$  % (рис. 3).

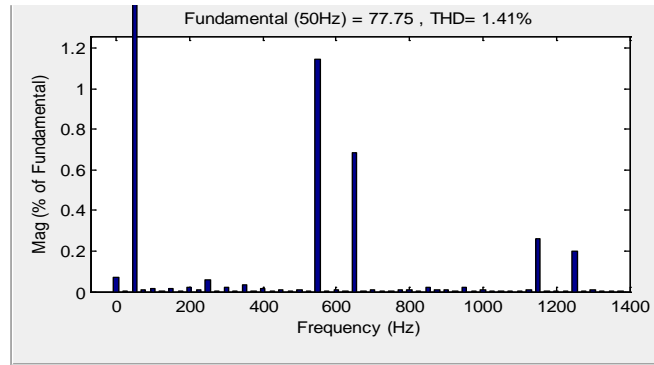


Рис. 3. Амплітудний спектр струму мережі АФ з прямим формуванням компенсаційного струму

Система прямого керування струмом САФ у разі використання вектора фазних струмів і вектора фазних напруг (рис. 4) може бути використана і для компенсації реактивної потужності.

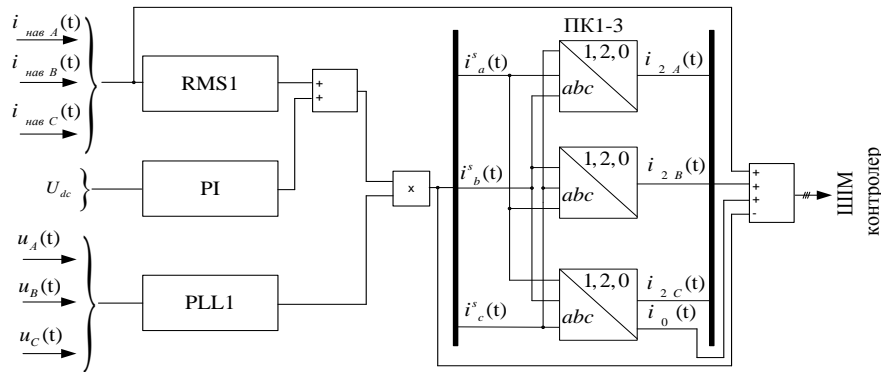


Рис. 4. Система прямого керування струмом САФ для компенсації вищих гармонік, симетрування навантаження та компенсації реактивної потужності

У цьому випадку блок формування компенсаційного струму, до прикладу, фази *A*, формує сигнал  $\sqrt{2}|I_A|\sin(\omega t + \psi_A)$ , де  $\psi_A$  — початкова фаза напруги. Для цього на виході блока фазового автоналагоджувача частоти PLL1 формується сигнал  $\sqrt{2}\sin(\omega t + \psi_A)$ , який синфазний до напруги фази *A*. Блок RMS1 формує діюче значення несинусоїдного струму фази  $|I_A|$ . Перемноження цих величин забезпечує формування синусоїдного сигналу  $|I_A|\sin(\omega t + \psi_A)$ , що дещо перевищує активну складову основної гармоніки фазного струму навантаження фази *A*,  $|I_A| \cdot \cos \phi_A \cdot \sin(\omega t + \psi_A)$ . Початкове перерегулювання реактивної потужності автоматично компенсується. Регулювання реактивної потужності здійснюється опосередковано контуром підтримки напруги на конденсаторі інвертора напруги активного фільтра.

Результати моделювання показані на рис. 5 і в табл. 2. На основі результатів моделювання можна зробити висновок про достатньо високу швидкодію компенсації перерегулювання реактивної потужності.

Таблиця 2

Результати моделювання САФ з компенсацією реактивної потужності

Значення фізичних величин для несиметричного несинусоїдного режиму	Значення параметрів струмів фази <i>A</i>	Значення параметрів струмів фази <i>B</i>	Значення параметрів струмів фази <i>C</i>
Амплітудні комплексні значення струмів навантаження ( $I_L, A$ )	$118,0 e^{-j34,6}$	$58,1 e^{j216,8}$	$58,1 e^{j96,8}$
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів навантаження ( $THD_I, \%$ )	5,77	11,75	11,75
Амплітудні комплексні значення струмів мережі ( $I_S, A$ )	$68,5 e^{-j0,2}$	$68,5 e^{j239,7}$	$68,4 e^{j119,7}$
Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів мережі ( $THD_I, \%$ )	0,38	0,27	0,28

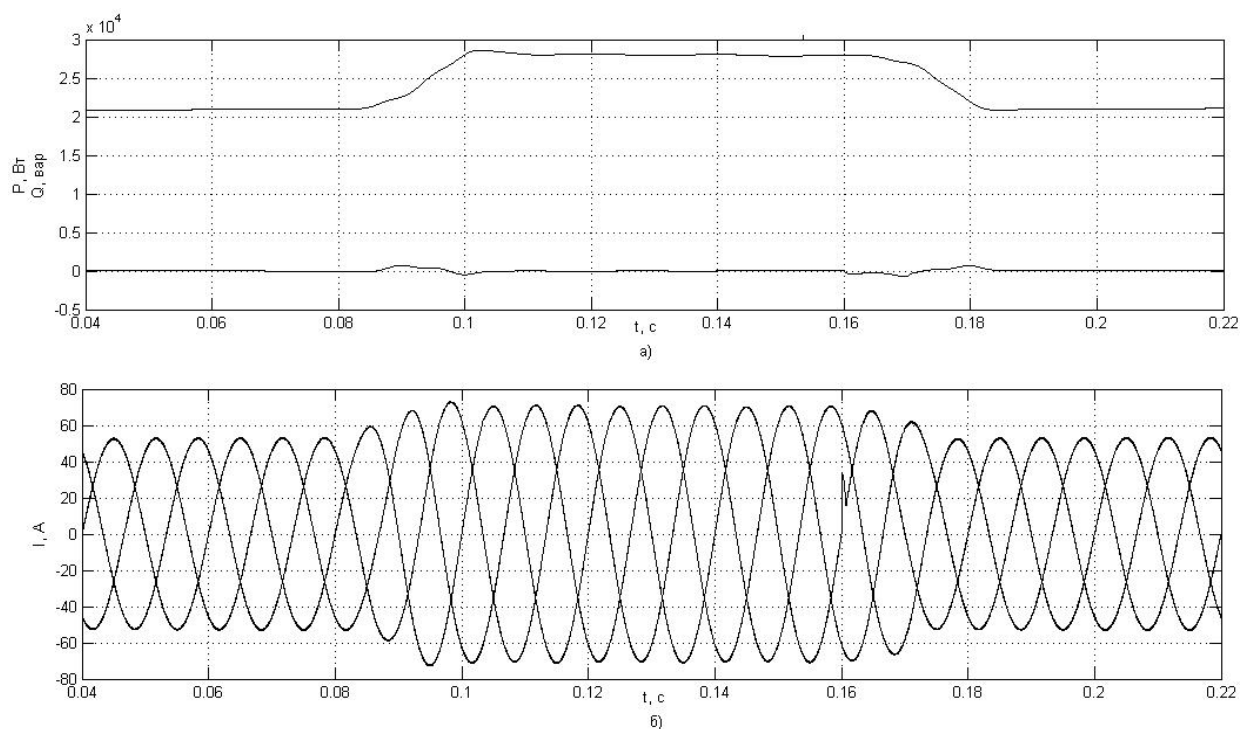


Рис. 5: а — миттєві потужності; б — струми мережі під час роботи САФ з компенсацією реактивної потужності

### Висновки

Удосконалено систему прямого керування струмом активного фільтра, що дозволяє ефективніше керувати силовими активними фільтрами за рахунок розділення контурів компенсації гармонічних спотворень, симетрування струмів та компенсації реактивної потужності. До переваг цієї системи керування можна також віднести простоту її реалізації.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*, IEEE Press, Wiley-Interscience, 2007.
- [2] H. Akagi, "Active harmonic filters," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, № 12, pp. 2128-2141, 2005.
- [3] H. Akagi, "Modern Active Filters and Traditional Passive Filters," *Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Sciences*, vol. 54, pp. 255-269, 2006.
- [4] В. В. Бурлака, С. К. Поднебенна, і С. В. Гулаков, *Сучасні силові активні фільтри та імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності*. Маріуполь, Україна: ПДТУ, 2015.
- [5] F. Z. Peng, and J. S. Lai, "Generalized instantaneous reactive power theory of three-phase power systems," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 45, № 1, pp. 293-297, 1996.
- [6] J. C. Montano, P. Salmeron, and J. P. Thomas, "Analysis of Power Losses for Instantaneous Compensation of Three-Phase Four-Wire System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, № 4, pp. 901-907, 2005.
- [7] J. C. Montano, and P. Salmeron, "Compensation in nonsinusoidal, unbalanced three-phase four-wire systems with active power-line conditioner," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, № 4, pp. 1079-1084, 2002.
- [8] М. Ю. Артеменко, Л. М. Батрак, В. М. Михальський, і С. Й. Поліщук, «Оптимізація енергетичних характеристик трифазної чотирипровідної системи живлення з паралельним активним фільтром у несиметричному синусоїдному режимі», *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 30-37, 2015.
- [9] М. Ю. Артеменко, і В. В. Каплун, «Енергоефективність паралельних активних силових фільтрів трифазних систем електроживлення», *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*, № 5 (102), с. 11-19, 2016.
- [10] С. Й. Поліщук, М. Ю. Артеменко, В. М. Михальський, і Л. М. Батрак, «Спосіб керування паралельним активним фільтром чотирипровідної трифазної мережі», *МПК Н02Р 9/00, № 84949*, Бюл. № 21, Лист. 11, 2013.
- [12] М. Й. Бурбело, і Ю. В. Лобода, «Система прямого керування струмом статичного синхронного компенсатора», in *Science, Research, Development #26, Technics And Technology*, Познань/Roznan, 27.02.2020–28.02.2020 р.
- [12] М. Й. Бурбело, і О. В. Степура, «Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії», *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Енергетика: надійність та енергоефективність*, № 14 (1339), с. 78-82, 2019.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 8.04.2021

**Бурбело Михайло Йосипович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

**Лобода Юрій Васильович** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: lobodaeseem@gmail.com ;

**Лебедь Денис Юрійович** — аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**M. Yo. Burbelo<sup>1</sup>**  
**Yu. V. Loboda<sup>1</sup>**  
**D. Yu. Lebed<sup>1</sup>**

## Active Filter Current Direct Control System

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The main direction of research is the optimization of the active filter, simplification of the control system and the identification of new algorithms for calculating the compensating currents. There has been improved the direct current control system of active filter with the formation of sinusoidal signals equal to the fundamental harmonic of phase load currents, as well as non-sinusoidal asymmetric signals, as the difference between input phase currents of load and fundamental harmonics, to filter higher harmonics and balancing currents filtering of higher harmonics and balancing of nonlinear asymmetric loads. The control system, which consists of two units: the unit for generating the current compensation of higher harmonics and the unit for converting currents from the phase coordinate system to the coordinate system of instantaneous symmetrical components, provides almost complete compensation for linear and nonlinear distortion. In the case of using one unit for converting currents from the phase coordinate system to the coordinate system of instantaneous symmetrical components, which significantly simplifies the implementation of the control system, provides sufficient for mass consumers quality compensation of higher harmonics (provides compensation of the third, fifth, seventh and ninth current harmonics, and the level of uncompensated higher harmonics is determined by the eleventh and thirteenth harmonics, the content of which is significantly lower) and full load balancing. It is shown that the system of direct current control of the active filter in the case of using the vector of phase currents and the vector of phase voltages can be used for full compensation of reactive power. In this case, there is a slight initial overregulation of the reactive power, which is automatically compensated. The reactive power is regulated indirectly by the voltage support circuit on the capacitor of the active filter voltage inverter.*

**Keywords:** electric networks, asymmetric non-sinusoidal modes, symmetrical components, higher harmonics, active filter, control system.

**Burbelo Mykhailo Yo.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

**Loboda Yuriy V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: lobodaeseem@gmail.com ;

**Lebed Denys Yu.** — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com

**М. И. Бурбело<sup>1</sup>**  
**Ю. В. Лобода<sup>1</sup>**  
**Д. Ю. Лебедь<sup>1</sup>**

## Система прямого управления током активного фильтра

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Основным направлением исследования является оптимизация работы активного фильтра, упрощение системы управления и выявление новых алгоритмов расчета компенсирующих токов. Усовершенствована система прямого управления током активного фильтра с формированием синусоидальных сигналов, равных основной*

гармонике фазных токов нагрузки, а также несинусоидальных несимметричных сигналов, в виде разности входных фазных токов нагрузки и основной гармоники, для фильтрации высших гармоник и симметрирования токов нагрузки, что позволяет обеспечить разделение контуров фильтрования высших гармоник и симметрирования нелинейных несимметричных нагрузок. Система управления, состоящая из двух блоков: блока формирования тока компенсации высших гармоник и блока преобразования токов из системы фазных координат в систему координат мгновенных симметричных составляющих, обеспечивает практически полную компенсацию линейных и нелинейных искажений. При использовании одного блока преобразования токов из системы фазных координат в систему координат мгновенных симметричных составляющих, что существенно упрощает реализацию системы управления, обеспечивается достаточное для массовых потребителей качество компенсации высших гармоник (обеспечивается компенсация третьей, пятой, седьмой и девятой гармоник тока, а уровень высших гармоник, которые не компенсируются, определяется одиннадцатой и тринадцатой гармониками, содержание которых существенно ниже) и полное симметрирование нагрузок. Показано, что систему прямого управления током активного фильтра при использовании вектора фазных токов и вектора фазных напряжений можно применять и для полной компенсации реактивной мощности. В этом случае происходит незначительное первоначальное перерегулирование реактивной мощности, которое автоматически компенсируется. Регулирование реактивной мощности осуществляется косвенно контуром поддержания напряжения на конденсаторе инвертора напряжения активного фильтра.

**Ключевые слова:** электрические сети, несимметричные несинусоидальные режимы, симметричные составляющие, высшие гармоники, активный фильтр, система управления.

**Бурбело Михаил Иосифович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

**Лобода Юрий Васильевич** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: lobodaeseem@gmail.com ;

**Лебедь Денис Юрьевич** — аспирант кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com