

**В. С. Козлов**<sup>1</sup>  
**І. І. Пересунько**<sup>1</sup>  
**А. О. Антоненко**<sup>1</sup>

## АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИЛОВИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ НА ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ

<sup>1</sup>Криворізький національний університет

*Розглянуто стратегії впровадження силових активних фільтрів на об'єктах промисловості (індивідуальна компенсація, групова компенсація, загальна компенсація, змішана компенсація). Наведено основні складові методу визначення вибору найдоцільнішої стратегії впровадження силових активних фільтрів. Як коректор авторами запропоновано використовувати активний фільтр із системою екстремального регулювання, оснований на використанні «критерію якості компенсації», мінімізуючи який досягається найкращий результат корекції для конкретного пристрою. В статті наведено результати фізичного моделювання прототипу силового активного фільтра, який працює в режимі подавлення вищих гармонік струму, балансування навантаження та компенсації реактивної потужності.*

**Ключові слова:** силовий активний фільтр, вищі гармоніки, реактивна потужність, енергозбереження.

### Вступ

Сучасні силові активні фільтри (САФ) є ефективним засобом для розв'язання низки задач, пов'язаних із показниками якості електричної енергії (ПЯЕ): компенсацією реактивної потужності, симетруванням фазних струмів (напруг), подавленням вищих гармонік тощо [1]. З іншого боку, активні фільтри можна застосовувати для компенсації втрат потужності в мережі живлення [2]. Таким чином, САФ є невід'ємною технічною складовою сучасної концепції енергозбереження.

Розв'язуючи задачі енергозощадження об'єкта за допомогою активних фільтрів необхідно враховувати низку факторів: рівень відхилення ПЯЕ від регламентованих норм на окремих ключових ділянках об'єкта та на межі балансової належності між енергогенеруючою кампанією та споживачем, величину втрат потужності в мережі об'єкта, кількість, вагомість та режим роботи забрудників «електроенергії» тощо. Відповідно до перелічених факторів необхідно приймати рішення щодо компенсації ПЯЕ або втрат потужності електромережі (групова, індивідуальна, центральна або змішана компенсація).

Обмеження на застосування конкретного виду САФ можуть накладати попередньо поставлені задачі, а саме: робота в умовах несиметричної або несинусоїдної напруги [3], необхідність компенсувати вибіркові гармоніки, вимоги, пов'язані з динамікою швидкозмінного навантаження тощо. Іншим недоліком САФ є відносно велика вартість коректора [2].

*Метою роботи* є постановка задачі та розроблення основних складових методу визначення впровадження САФ на великому промисловому об'єкті.

### Результати дослідження

Впровадження САФ на промисловому об'єкті може здійснюватися за такими стратегіями: індивідуальна компенсація, групова компенсація, загальна компенсація, змішана компенсація. Остання стратегія поєднує у собі попередні перелічені варіанти. Вихідні дані, які пропонуються для методу визначення конкретної стратегії компенсації такі:

- відхилення ПЯЕ від регламентованих норм на ключових ділянках об'єкта;
- параметри кабельних ліній системи живлення (для визначення втрат потужності в системі живлення);
- тип споживачів електроенергії, їх режим роботи для визначення найбільш «критичних забрудників» електричного енергопотуку;
- наявність компенсаторів в системі живлення;
- існування або відсутність проблем резонансу в системі електропостачання;

— існування або відсутність хибних спрацювань цифрових систем захисту, керування технічним процесом.

Особливості кожної стратегії компенсації показано в таблиці.

**Особливості стратегій компенсації**

Рівень інтеграції із навантаженням	Вид компенсації		
	Індивідуальна компенсація	Групова компенсація	Загальна компенсація
	Високий (можливість поєднання САФ та навантаження в єдину систему)	Низький (можливість поєднання декількох споживачів із САФ)	Відсутній
Режим корекції для САФ	Компенсація ПЯЕ або компенсація втрат потужності мережі	Компенсація ПЯЕ або компенсація втрат потужності мережі	Компенсація ПЯЕ
Компенсація вибіркового гармонік	Доцільно мати режим компенсації вибіркового гармонік	Доцільно мати режим компенсації вибіркового гармонік	Низька необхідність
Компенсація реактивної потужності та необхідність балансування навантаження	Низька необхідність	Доцільно мати зазначені режими роботи	Висока необхідність мати зазначені режими роботи

До таблиці необхідно зробити декілька ремарок:

— вибіркочу компенсацію слід застосовувати у разі виявлення невеликої кількості найвагомійших забрудників. Для виключення негативної дії останніх на мережу доцільно встановлювати САФ меншої потужності, який працюватиме в режимі компенсації вибіркового гармонік.

— на вході великого електроенергетичного об'єкта коефіцієнт гармонік струму (напруги) зазвичай значно менший, ніж в окремих точках об'єкта. Цей факт пояснюється взаємним частковим подавленням вищих гармонік від різних нелінійних споживачів у межах одного енергетичного об'єкта;

— для САФ економічно найвигіднішим є режим компенсації вищих гармонік та режим компенсації несиметрії. У цьому випадку встановлена потужність компенсатора є значно меншою у той час, як режим компенсації реактивної потужності може вимагати встановленої потужності САФ, яку можна порівняти із потужністю навантаження;

— одна з причин застосування загальної компенсації полягає у виключенні проблем, пов'язаних із лічильниками реактивної енергії, які можуть виникати при відхиленні ПЯЕ від регламентованих норм [5];

— за точку відліку для оцінки ефективності впровадження САФ, що працюють у режимі компенсації втрат потужності, можна обрати показники лічильників активної та реактивної енергії. При цьому необхідно враховувати тип лічильника [5]. Наприклад, в роботі [6] показано, що в залежності від типу лічильника реактивної потужності можна досягти зменшення показань реактивної енергії шляхом компенсації вищих гармонік. Цей факт пояснюється використанням розробниками в деяких цифрових лічильниках математичного апарату, що враховує вплив вищих гармонік.

В режимі компенсації втрат потужності в мережі активні втрати зменшуються на величину

$$\Delta P = (I_H^2 - I_{HC}^2) R = R \cdot \sum_{n=1}^{\infty} K_n \cdot (I_{Hn}^2 - I_{H2n}^2), \quad (1)$$

де  $\Delta P$  — активні втрати в мережі;  $I_H$ ,  $I_{HC}$  — струм мережі до та після компенсації;  $R$  — активний опір кабелю;  $n$  — порядковий номер гармоніки струму;  $K_n$  — коефіцієнт скін-ефекту;  $I_{Hn}$ ,  $I_{H2n}$  — діючі значення гармонік струму.

Опір кабелю можна визначити за виразом

$$R = \rho \frac{l}{s} (1 + \alpha (t_{ж} - 20)), \quad (2)$$

де  $\rho$ ,  $l$ ,  $s$  — питомий опір матеріалу кабелю, довжина кабелю, переріз кабелю;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт;  $t_{ж}$  — температура жили.

Формула (1) є правильною за умови синусоїдності напруги мережі. Тоді, в разі компенсації всіх вищих гармонік активні втрати зменшаться на величину

$$\Delta P' = R \cdot \sum_{n=2}^{\infty} K_n \cdot (I_{Hn}^2). \quad (3)$$

Додамо, що для уточнених розрахунків необхідно враховувати не тільки зміну опору жили кабелю з підвищенням частоти струму та температури, а й взаємовплив жил кабелю між собою.

В якості САФ, який працює в режимі корекції ПЯЕ (загальна компенсація) пропонується використовувати пристрій із системою екстремального регулювання (ЕР), заснований на «критерії якості компенсації» [4]. Мінімізуючи значення вищезгаданого критерію досягається оптимальний результат роботи САФ.

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25,27,29,31,33,35,37,39} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} \rightarrow 0; \\ \arg(\overline{U_{(1)}}) - \arg(\overline{I_{(1)}}) \rightarrow 0, \end{cases} \quad (4)$$

де  $U_{(1)}$ ,  $I_{(1)}$  — узагальнені вектори напруги та струму мережі;  $I_{(n)}$  — амплітуда узагальненого вектора струму  $n$ -ї гармоніки;  $n$  — порядок гармоніки.

Критерій мінімізує сумарний коефіцієнт гармонік порядків першого та третього десятків за умови генерації струму першої гармоніки у фазі з напругою першої гармоніки мережі.

Структурна схема САФ с ЕР виглядатиме як на рис. 1.

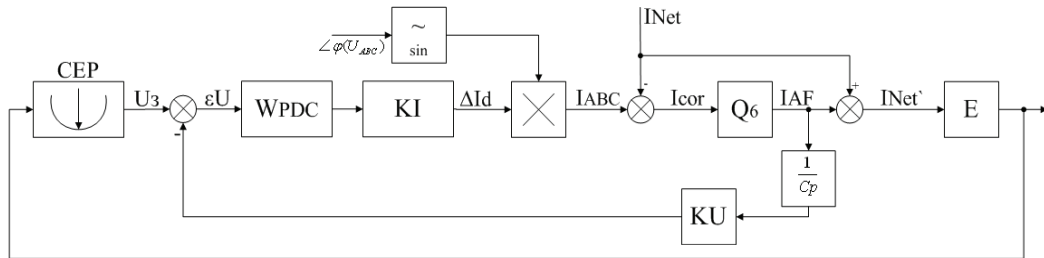


Рис. 1. Структурна схема САФ з ЕР: СЕР — блок екстремального регулятора,  $U_3$  — напруга завдання в ланці постійного струму;  $\varepsilon U$  — сигнал похибки вищезазначеної напруги;  $\angle \varphi(U_{ABC})$  — кут вектора напруги мережі живлення першої гармоніки прямої послідовності;  $W_{PDC}$  — регулятор напруги;  $KI$  — коефіцієнт узгодження напруги в ланці постійного струму та активного струму мережі;  $\Delta Id$  — амплітудне значення активного струму навантаження;  $I_{ABC}$  — вектор струму завдання першої гармоніки прямої послідовності (синусоїда);  $I_{cor}$  — вектор завдання струму корекції САФ;  $Q_6$  — силовий інвертор;  $I_{AF}$  — струм корекції САФ;  $I_{Net}$  та  $I_{Net}'$  — струм мережі до та після корекції;  $C$  — значення ємності конденсаторної батареї;  $E$  — блок обчислення критерію якості (цільова функція для ЕР);  $kU$  — коефіцієнт напруги для зворотного зв'язку за напругою

Контур регулювання напруги є внутрішнім по відношенню до контуру системи екстремального регулювання. Необхідно зазначити, що ЕР може впливати на амплітудне *розрахункове* значення суми активних втрат САФ та активної потужності (активного струму мережі)  $\Delta Id$ , обходячи контур регулювання напруги.

Достовірність запропонованого математичного апарату підтверджено на основі фізичного моделювання комплексу «Мережа-САФ-Навантаження». На рис. 2, рис. 3 показано структурну схему моделі енергетичного об'єкта та цифрові осцилограми результатів дослідження компенсації вищих гармонік, несиметрії та реактивної потужності. На схемі (рис. 2)  $R1 \neq R2 \neq R3$  та кути керованого випрямляча для кожного плеча  $\alpha_A \neq \alpha_B \neq \alpha_C$ . Параметри експериментальної установки: напруга живлення становить 12 В, струм навантаження  $\approx (0,5 \dots 1)$  А, активна потужність  $\approx 16$  Вт.

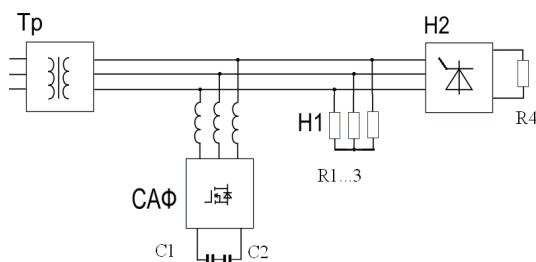


Рис. 2. Структурна схема тестової мережі

Для початку роботи (або налаштуванні на новий оптимальний рівень уразі зміни навантаження мережі) САФ вимагає часової затримки, що дорівнює одному періоду напруги живлення. Далі починається компенсація ПЯЕ мережі із налаштуванням на оптимальний рівень. Практично в ході зазначеного експерименту цифрова система керування настроює САФ на оптимальний рівень за час 30...40 періодів напруги живлення. *Підкреслимо*, що корекція мережі під час

налаштування на оптимальний рівень відбувається з якістю, близької до такої, що забезпечує класичний варіант САФ без ЕР

На рис. 3 показано усталений режим роботи САФ (оптимальний рівень) та початковий період перед налаштуванням. В результаті корекції коефіцієнт гармонік струму зменшено з  $\approx 20\%$  до  $\approx 11\%$ , реактивну потужність першої гармоніки зменшено на  $\approx 61\%$ , коефіцієнт несиметрії струму за зворотною послідовністю зменшено з  $\approx 11\%$  до  $\approx 2\%$ , коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю зменшено з  $\approx 4\%$  до  $\approx 3\%$ .

### Висновки

Розроблено метод визначення вибору найдоцільнішої стратегії впровадження силових активних фільтрів на об'єктах промисловості. Такими стратегіями можуть бути індивідуальна, групова, загальна та змішана компенсації показників якості електроенергії. Розглянуто також, особливості режиму компенсації коректорами активних втрат в мережі.

Як активний фільтр запропоновано варіант на основі екстремального керування із застосуванням критерію «якості компенсації», мінімізуючи який пристрій вводять в оптимальний режим роботи. Подано результати фізичного моделювання прототипу силового активного фільтра, який працює в режимі подавлення вищих гармонік струму, балансування навантаження та компенсації реактивної потужності: коефіцієнт гармонік струму зменшено з  $\approx 20\%$  до  $\approx 11\%$ , реактивну потужність першої гармоніки зменшено на  $\approx 61\%$ , коефіцієнт несиметрії струму за зворотною послідовністю зменшено з  $\approx 11\%$  до  $\approx 2\%$ , коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю зменшено з  $\approx 4\%$  до  $\approx 3\%$ .

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters / Akagi H. // Bulletin of the Polish Academy of science. Technicalsciences. — 2006. — Iss. 54. — Pp. 255—269.
2. Волков В. А. Методика оценки энергоэффективности использования силового активного фильтра / В. А. Волков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи, 2012. — Вип. 3. (19) — С. 213—215.
3. Czarnecki L. S. On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. On Power Electronics. — 2004. — Vol. 19, No. 3. — Pp. 828—836.
4. Омельченко О. В. Силовий активний фільтр із системою екстремального регулювання / О. В. Омельченко, В. С. Козлов // Вісник НТУ «ХПІ». — Харків : НТУ «ХПІ», 2015. — Вип. 12 (1121). — С. 439—442.
5. Давыдов А. С. Особенности измерения полной и реактивной мощности и энергии в электрических сетях / А. С. Давыдов, А. Н. Попенка, В. В. Аникин // Український метрологічний журнал, 2009. — № 2. — С. 11—15.
6. Сінолиций А. П. Ефективність використання активного фільтра струму з точки зору класичної системи енергообліку / А. П. Сінолиций, В. А. Кольсун, В. С. Козлов // Вісник Криворізького національного університету. — 2014 — Вип. 36. — С. 88—92.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.11.2015

**Козлов Владислав Сергійович** — асистент кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, e-mail: vskpost@yandex.ru;

**Пересунько Ігор Ігорович** — аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті;

**Антоненко Андрій Олегович** — аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті.

Державний ВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг

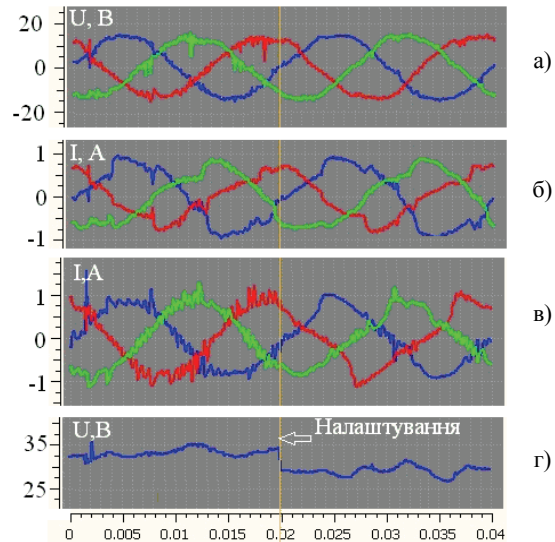


Рис. 3. Осцилограми цифрового осцилографа: а — напруга мережі, б — струм навантаження, в — струм мережі, г — напруга в ланці постійного струму

V. S. Kozlov<sup>1</sup>  
I. I. Peresunko<sup>1</sup>  
A. O. Antonenko<sup>1</sup>

## Features of Implementation of Power Active Filters to Industry Enterprise

<sup>1</sup>Krivyi Rih National University

*There have been considered the method of implementation strategy of active power filters to industry energy objects. The foregoing method helps to determine the most appropriate implementation strategy of compensation (the individual compensation, group compensation, total compensation or mixed compensation). As a corrector authors proposed to use active power filter with extremum-seeking system regulation based on a «compensation criterion». The best result of the correction for the specific device achieved by minimizing proposed criterion. The article presents the results of physical modeling of the power active filter prototype that works in regime of removing higher current harmonic, load balancing and reactive power compensation.*

**Keywords:** shunt active power filter, higher harmonics, reactive power, energy saving technologies.

**Kozlov Vladyslav S.** — Assistant of the Chair of Automated Electromechanical Systems in Industry and Transport, e-mail: vskpost@yandex.ru;

**Peresunko Ihor I.** — Post-Graduate Student of the Chair of Automated Electromechanical Systems in Industry and Transport;

**Antonenko Andrii O.** — Post-Graduate Student of the Chair of Automated Electromechanical Systems in Industry and Transport

В. С. Козлов<sup>1</sup>  
И. И. Пересунько<sup>1</sup>  
А. О. Антоненко<sup>1</sup>

## Аспекты внедрения силовых активных фильтров на промышленных объектах

<sup>1</sup>Криворожский национальный университет

*Рассмотрены стратегии внедрения силовых активных фильтров на объектах промышленности (индивидуальная компенсация, групповая компенсация, общая компенсация, смешанная компенсация). Приведены основные составляющие метода определения выбора наиболее целесообразной стратегии внедрения силовых активных фильтров. В качестве корректора авторами предложено использовать активный фильтр с системой экстремального регулирования, основанный на использовании «критерия качества компенсации», минимизируя который достигается лучший результат коррекции для конкретного устройства. В статье приведены результаты физического моделирования прототипа силового активного фильтра, который работает в режиме подавления высших гармоник тока, балансировки нагрузки и компенсации реактивной мощности.*

**Ключевые слова:** силовой активный фильтр, высшие гармоники, реактивная мощность, энергосбережение.

**Козлов Владислав Сергеевич** — ассистент кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте, e-mail: vskpost@yandex.ru;

**Пересунько Игорь Игоревич** — аспирант кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте;

**Антоненко Андрей Олегович** — аспирант кафедры автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте