

УДК 621.314

**А. П. Сінолиций**, д-р техн. наук,  
**В. А. Кольсун**, канд. техн. наук,  
**В. С. Козлов**

### ЕКСТРЕМАЛЬНИЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ СТРУМУ

**Анотація.** Запропоновано новий підхід для керування силовими активними фільтрами, що не потребує обчислення конкретних складових повної потужності електромережі. Основою інтелектуальної частини активного фільтру є екстремальний регулятор. Синтезована система керування дозволяє побудувати пристрій із меншою кількістю датчиків та забезпечити оптимальну корекцію енергопотуку.

**Ключові слова:** активний фільтр, пошукова система, екстремальний регулятор, реактивна потужність, енергоефективність, вищі гармоніки

**A. F. Sinolitsyy**, ScD.,  
**V. A. Kolsun**, PhD.,  
**V. S. Kozlov**

### EXTREMUM-SEEKING REGULATOR FOR ACTIVE SHUNT POWER FILTER

**Abstract.** The new concept of intellect control system for active power filters is presented. The main part of intellect control system of device is extremum-seeking regulator. Synthesized control system allows to create devices with less number of sensors and to maintain optimum energy flow correction.

**Keywords:** active filter, STATCOM, extremum-seeking, reactive power, reactive power, higher harmonics

**А. Ф. Сінолиций**, д-р техн. наук,  
**В. А. Кольсун**, канд. техн. наук,  
**В. С. Козлов**

### ЭКСТРЕМАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ТОКА

**Аннотация.** Предложен новый подход в управлении силовыми активными фильтрами, который не требует прямого вычисления составляющих полной мощности электросети. Основной составляющей новой системы управления является экстремальный регулятор. Предложенный подход позволяет создать устройства с меньшим числом датчиков и обеспечить оптимальную коррекцию энергопотока.

**Ключевые слова:** активный фильтр, поисковая система, экстремальный регулятор, реактивная мощность, энергоэффективность, высшие гармоники

**Вступ.** Силові активні фільтри (САФ) є низкою пристроїв, призначених для корекції електричного енергопотуку мережі живлення. САФ різняться за топологією [1] та математичним апаратом [2 – 3], на основі якого побудовано інтелектуальну частину керування. Існує велика низка алгоритмів для виділення необхідного сигналу корекції, які можна розділити на методи частотного (перетворення Фур'є, СРС теорія [4] та ін.) та часового (p-q теорія [5], метод Фрізе [6] тощо) базисів. Зазвичай, більш прості алгоритми не мають можливості працювати в декількох режимах, наприклад компенсація вибіркових гармонік струму, компенсація реактивної потужності, робота в умовах несиметрії напруги [7] тощо. Більш складні алгоритми (СРС теорія) є незручними в аспекті практичної реалізації.

Що стосується силової частини, то найбільш розповсюдженим варіантом САФ є активний фільтр струму на базі інвертора напруги з шістьма ключами та ємністю в ланці постійного струму [1]. Зазначену топологію обрано за основу для подальших досліджень.

Конфігурація силової частини САФ може дещо відрізнитися в залежності від поставленої задачі та алгоритмів керування пристроєм. Наприклад, для

виконання задачі компенсації реактивної потужності, зазвичай, САФ містить три датчики напруги мережі, 6 датчиків струму та датчик напруги ланки постійного струму, яка може підтримуватися на постійному рівні як шляхом ускладнення основного алгоритму, так і введенням у склад САФ додаткових схемотехнічних вузлів [8].

Запропонована в роботі стратегія керування САФ дозволяє зменшити кількість датчиків струму в 2 рази. Іншою перевагою запропонованого метода керування САФ є гнучке регулювання напруги на ємності в ланці постійного струму пристрою. Такий підхід дозволяє досягти найменшого для конкретного САФ значення коефіцієнту гармонік струму (напруги) під час роботи.

**Матеріали досліджень.** Основною ідеєю запропонованої системи регулювання є застосування алгоритмів пошуку екстремуму [9 – 10]. Оскільки найбільш простою задачею для САФ є видалення вищих гармонік, то пошук екстремуму необхідно здійснювати на кривій коефіцієнту гармонік струму мережі (для паралельного САФ). Іншими передумовами для синтезу пошукової системи стали наступні факти.

1) У ході практичних експериментів було виявлено, що при зменшенні напруги на ємності інвертора нижче рівня  $2,34 \cdot U_{Phase}$  (де  $U_{Phase}$  – фазна напруга) коефіцієнт гармонік струму мережі значно

погіршується. При збільшенні напруги на ємності вище рівня  $2,34 \cdot U$  коефіцієнт гармонік покращується, але при досягненні деякої точки (екстремуму), процес корекції сигналу мережі знову погіршується. Явище ілюструє рис. 1.

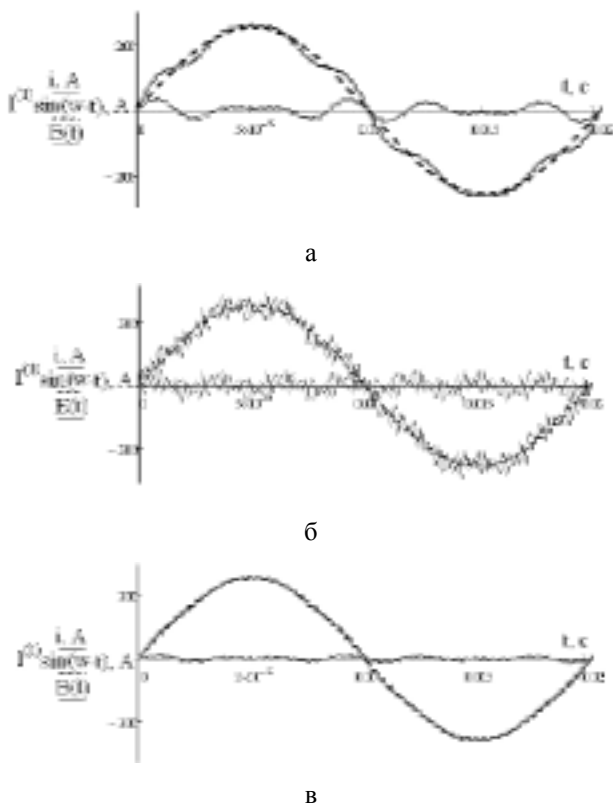


Рис. 1. Приклади струму мережі, першої гармоніки струму мережі та похибки при зменшенні (а), збільшенні (б) напруги на ємності та при оптимальному рівні (в)

При зменшенні напруги на ємності нижче точки екстремуму струм мережі наближується до струму навантаження. Такий процес можна назвати «недокомпенсацією». При збільшенні напруги на ємності вище точки екстремуму у формі струму мережі збільшується рівень високочастотних компонент. При оптимальному рівні напруги теоретично похибка корекції повинна бути обумовлена величиною струмового коридору.

2) Рівнем напруги на ємності можна керувати без додаткових схемотехнічних заходів, використовуючи лише основний алгоритм виділення струму корекції. При цьому на практиці напругу на ємності можна збільшувати у відносно широких межах.

3) Для багатьох відомих алгоритмів керування інтелектуальною частиною САФ регулювання напруги на ємності відбувається за рахунок регулювання абсолютного значення активної потужності мережі або її енергетичного еквівалента (активний струм, активна провідність тощо).

Нагадаємо, що використання екстремального регулятора виправдане, коли точка екстремуму показника якості достатньо чітко визначена та

змінюється в залежності від зовнішніх або внутрішніх факторів, які обумовлені процесом експлуатації.

Таким чином, систему екстремального регулювання можна побудувати засновуючись на регулюванні (підстройці) активної потужності або її еквівалента, спостерігаючи за зміною коефіцієнту гармонік. Якщо врахувати можливість регулювання напруги на ємності через значення активної потужності або її еквіваленту, то пошукову систему можна ускладнити, додавши внутрішній контур стабілізації напруги. Такий крок надає можливість більш гнучкого регулювання коефіцієнту гармонік сформованого сигналу. Також зазначимо, що за базовий алгоритм виділення сигналу корекції теоретично можна обирати будь-який відомий алгоритм, що використовує значення активної потужності або її еквіваленту.

В першому наближенні система екстремального регулювання матиме вигляд, представлений на рис. 2.

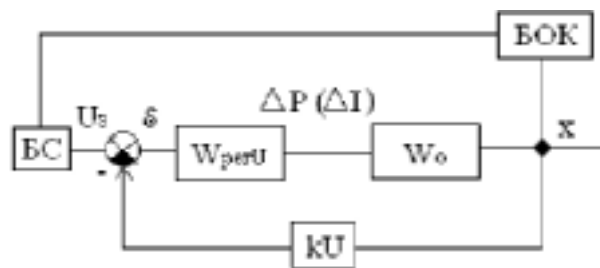


Рис. 2. Структурна схема екстремальної системи регулювання в першому наближенні

На рис. 2 БС – блок самопідстройки;  $U_z$  – напруга завдання;  $\epsilon$  – сигнал похибки;  $W_{perU}$  – регулятор напруги;  $\Delta P(\Delta I)$  – активна потужність фільтру або еквівалентна величина;  $W_o$  – об'єкт керування; БОК – блок обчислення критерію;  $x$  – вихідна величина;  $kU$  – коефіцієнт напруги для зворотного зв'язку за напругою.

Контур екстремального регулятора є зовнішнім по відношенню до контуру напруги. Сам екстремальний регулятор (БС) впливає безпосередньо на напругу завдання, що надходить до блоку регулятора напруги, який в свою чергу впливає на рівень активної потужності пристрою або іншої еквівалентної величини.

Нижче представлено результати фізичного моделювання процесу видалення гармонік струму від нелінійного навантаження в тестовій мікромережі.

Фазна напруга тестової мікромережі становить 12 В. Струм навантаження сягає близько 1 А.

З отриманих результатів видно (рис. 3, а), що пошукова система дозволяє знайти деяку зону оптимальної роботи, ширина якої становить приблизно  $1 \cdot U_{Phase}$ . За критерій оптимальності в тестовій системі прийнято суму квадратів похибки між сигналом завдання та сформованим сигналом мережі.

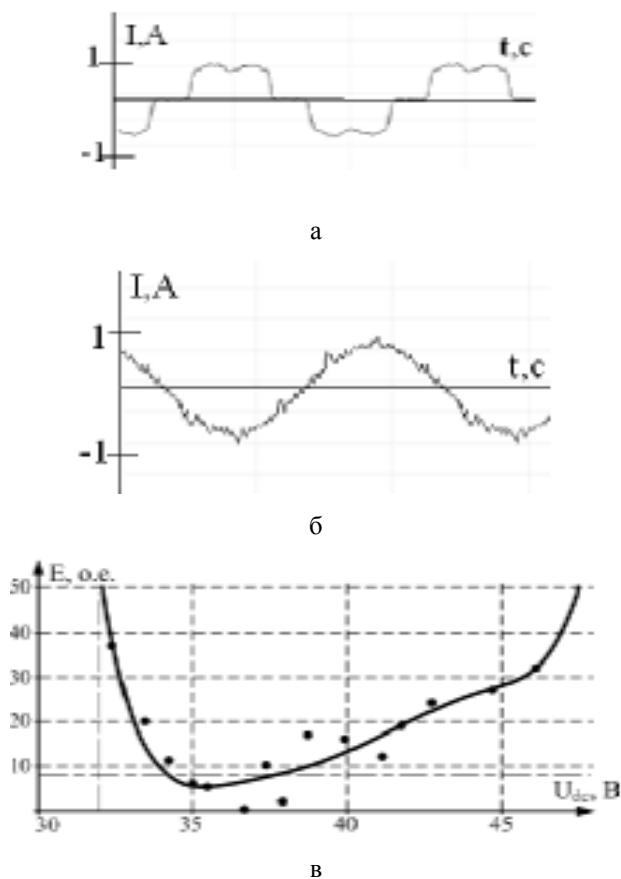


Рис. 3. Струм навантаження (а), струм мережі після корекції (б), апроксимована залежність критерію якості від напруги в ланці постійного струму (в)

**Висновки.** Запропоновано нову пошукову систему керування активним фільтром струму, основою якої є екстремальний регулятор. Система керування має внутрішній контур стабілізації напруги на ємності в ланці постійного струму фільтру та зовнішній контур екстремального регулятора. Такий підхід дозволяє досягти найменшого значення коефіцієнту гармонік струму, що і є метою роботи САФ, який працює в режимі видалення вищих гармонік струму. Достовірність запропонованого способу керування перевірено експериментально: САФ із новою системою керування працює в деякій зоні оптимальної роботи. Напруга в ланці постійного струму САФ може коливатися в межах  $1 \cdot U_{Phase}$ .

Іншою перевагою запропонованого способу керування САФ є зменшення кількості датчиків струму у порівнянні із «класичним» варіантом.

#### Список використаної літератури

1. Akagi H., (2006), Modern Active Filters and Traditional Passive Filters, *Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Sciences*, Vol. 54, pp. 255 – 269.
2. Asiminoaei L., Blaabjerg F, and Hansen S., (2005), Evaluation of Harmonic Detection Methods for

Active Power Filters Application, *APEC*, Vol. 1, pp. 635 – 641.

3. Тонкаль И. Е. Баланс энергий в электрических цепях / И. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк [и др.]; – К. : Наукова Думка, 1992. – 312 с.

4. Czarnecki L.S., (2008), Currents' Physical Components (CPC) Concept: a Fundamental of Power Theory, *Przegląd Elektrotechniczny*, R84, No. 6, pp. 28 – 37.

5. Akagi H., Watanabe E.H., and Aredes M., (2007), Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, New York, *Wiley*, 379 p.

6. Fryze S. Wrink-, Blind-, and Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung, (1932), *Elekt. Zeitschrift*, Vol. 53, No. 25, pp. 596 – 599.

7. Czarnecki L.S. On some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory, (2004), *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 828 – 836.

8. Asadi M., Ali Reza Jalilian, (2012), A Hybrid Active Power Filter Comprising an Active Electromagnetic Filter, *Przegląd Elektrotechniczny (ElectricalReview)*, R.88, NR10a, pp. 205 – 212.

9. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров // Учебное пособие для вузов по спец. «Автоматика и управление в техн. системах». – М. : Высш. шк., 1989. – 263 с.: ил.

10. Leyva R., Alonso C., I. Queinnec [and other], (2006), MPPT of Photovoltaic Systems using Extremum-Seeking Control, *IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 42, No. 1, pp. 249 – 258.

Отримано 27.06.2014

#### References

1. Akagi H., (2006), Modern Active Filters and Traditional Passive Filters, *Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Sciences*, Vol. 54, pp. 255 – 269 [In English].

2. Asiminoaei L., Blaabjerg F., and Hansen S., (2005), Evaluation of Harmonic Detection Methods for Active Power Filters Application, *APEC*, Vol. 1, pp. 635 – 641 [In English].

3. Tonkal' I.E., Novosel'tsev A.V., Denisjuk S.P. [i dr.] Balans energii v elektricheskikh tsepyakh [Energy Balance in Electrical Circuits], (1992), Kiev, Ukraine, *Naukova Dumka Publ.*, 312 p. [In Russian].

4. Czarnecki L.S., (2008), Currents' Physical Components (CPC) Concept: a Fundamental of Power Theory, *Przegląd Elektrotechniczny*, R84, No. 6, pp. 28 – 37 [In English].

5. Akagi H., Watanabe E.H., and Aredes M., (2007), Instantaneous Power Theory and Applications

to Power Conditioning, *New York: Wiley*, 379 p [In English].

6. Fryze S. Wink-, Blind-, and Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung, (1932), *Elekt. Zeitschrift*, Vol. 53, No. 25, pp. 596 – 599 [In German].

7. Czarnecki L.S., (2004), On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory, *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 828 – 836 [In English].

8. Asadi M., Jalilian A.R., (2012), A Hybrid Active Power Filter Comprising an Active Electromagnetic Filter, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R.88, NR10a, pp. 205 –212 [In English].

9. Aleksandrov A.G. Optimal'nye i adaptivnye sistemy [Optimal and Adaptive Systems], (1989), Moscow, Russian Federation, *Vyssh. shk. Publ.*, 263 p. [In Russian].

10. Leyva R., Alonso C., Queinnec I. [and other], (2006), MPPT of Photovoltaic Systems using Extremum-seeking Control, *IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 42, No. 1, pp. 249 – 258 [In English].



Сінолиций  
Анатолій Пилипович,  
д-р техн. наук, проф. каф.  
автоматизованих електро-  
механічних систем в  
промисловості та транспорті  
ДВНЗ «Криворізький  
національний ун-т».  
50027, Україна м. Кривий Ріг,  
вул. XXII Партз'їзду, 11.  
Тел.(80564) 65-56-54



Кольсун  
В'ячеслав Анатолійович,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
автоматизованих електро-  
механічних систем в  
промисловості та транспорті  
ДВНЗ «Криворізький  
національний ун-т».  
50027, м. Кривий Ріг,  
вул. XXII Партз'їзду, 11.  
Тел. 067-638-39-36.  
E-mail: kolsun\_va@3g.ua



Козлов  
Владислав Сергійович,  
аспірант каф. автоматизованих  
електромеханічних систем в  
промисловості та транспорті  
ДВНЗ «Криворізький  
національний ун-т».  
50027, м. Кривий Ріг, вул.  
XXII Партз'їзду, 11.  
Тел. +3-8-097-618-97-38.  
E-mail: vskpost@yandex.ru