

С. М. Пересада<sup>1</sup>  
С. М. Ковбаса<sup>1</sup>  
Ю. М. Зайченко<sup>1</sup>  
А. Ю. Дученко<sup>1</sup>

## СПОСТЕРІГАЧ ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ ТРИФАЗНОГО СТРУМУ ДЛЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

*Подано результати розробки та експериментального дослідження спостерігача гармонічного складу трифазного струму мережі живлення. Запропонований спостерігач базується на концепції розділення кожної гармоніки на позитивну та негативну послідовності. Розроблений спостерігач забезпечує асимптотичне оцінювання гармонічного складу струму мережі, що підтверджено шляхом математичного моделювання та експериментального тестування.*

**Ключові слова:** паралельний активний фільтр, спостерігач, вищі гармоніки, якість електроенергії, нелінійне навантаження

### Вступ

Більша частина електроенергії, що виробляється у світі, перетворюється в інші види енергії за допомогою різноманітних напівпровідникових перетворювачів, які є нелінійним навантаженням для мережі живлення. Типовими прикладами нелінійних навантажень є регульовані електроприводи, сучасні системи освітлення на основі люмінесцентних та світлодіодних ламп, джерела живлення промислової, побутової та офісної техніки, електродугові печі та ін. Такі пристрої споживають з мережі струм, форма якого значно відрізняється від синусоїди. Це призводить до виникнення вищих гармонічних складових струму  $i$ , як наслідок, до виникнення низки проблем, таких як втрата потужності, хибне спрацювання захисних пристроїв, вихід з ладу електронного обладнання. У випадку генерування занадто високого рівня гармонік енергопостачальні компанії можуть відмовити в підключенні до мережі.

Сьогодні якість електроенергії в країнах Європи регламентується стандартом [1], який є суворішим, ніж відповідний стандарт України [2]. Вимоги до якості електроенергії в Україні в найближчі роки будуть постійно зростати, що зумовлює актуальність наукових досліджень в області компенсації спотворень струму та напруги, що вносяться в мережу живлення нелінійними навантаженнями.

Традиційні пасивні фільтри, які дозволяють компенсувати вищі гармоніки струму мережі, мають суттєві недоліки, такі як чутливість до параметрів мережі, можливість компенсації лише однієї гармоніки, низькі масо-габаритні показники. Альтернативним шляхом є застосування паралельних активних фільтрів (ПАФ) [3], які є сучасним рішенням для компенсації спотворень струму та корекції коефіцієнта потужності навантаження. ПАФ набагато менше залежать від параметрів мережі, дозволяють компенсувати значну кількість гармонік (до 50 в сучасних серійних ПАФ), та мають високі масо-габаритні показники. Принцип роботи ПАФ полягає у генерації в мережу компенсуючого струму, рівного струму гармонічних спотворень та протилежного за знаком. Для формування компенсуючого струму необхідно виконувати аналіз гармонічного складу струму мережі в реальному часі, для чого можуть використовуватися різні методи [4, 5]. В роботі [6] авторами запропоновано підхід до оцінювання гармонічного складу струму, який базується на спостерігачі Люенбергера.

*Метою статті є подальший розвиток теоретичного рішення [6], його практична реалізація та проведення експериментальних досліджень з оцінювання гармонічного складу вхідного струму трифазного випрямляча, що працює на ємнісне навантаження.*

## Результати дослідження

Функціональна схема типового ПАФ зображена на рис. 1, де позначено:  $i_{LA}$ ,  $i_{LB}$ ,  $i_{LC}$  — струми навантаження,  $i_{AF}$ ,  $i_{BF}$ ,  $i_{CF}$  — струми фільтра,  $L$  — величина індуктивності, яка призначена для формування струмів фільтра,  $R$  — паразитний опір котушки індуктивності  $L$ ,  $C$  — ємність конденсатора ланки постійного струму, що виступає в якості накопичувача енергії. Давачі  $i_{LA}$ ,  $i_{LB}$ ,  $i_{LC}$  призначені для вимірювання струмів навантаження, на основі яких оцінюється гармонічний склад, давачі  $i_{AF}$ ,  $i_{BF}$ ,  $i_{CF}$  призначені для організації контурів регулювання струму на виході ПАФ.

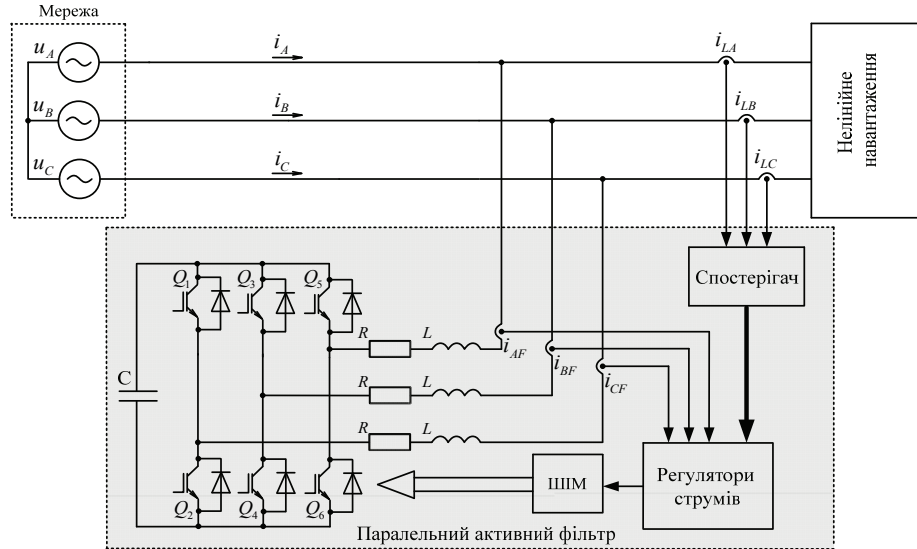


Рис. 1. Функціональна схема ПАФ

Згідно з методом гармонічних складових, несиметрична трифазна система може бути розкладена на три незалежні системи з симетричними компонентами [7]:

1. Пряму послідовність рівних за амплітудою компонент  $i_{LA}^P$ ,  $i_{LB}^P$ ,  $i_{LC}^P$ , зсунутих на  $2\pi/3$  один відносно одного, з чергуванням фаз — АВС.
2. Зворотну послідовність рівних за амплітудою компонент  $i_{LA}^N$ ,  $i_{LB}^N$ ,  $i_{LC}^N$ , зсунутих на  $2\pi/3$  один відносно одного, з чергуванням фаз — АСВ.
3. Нульову послідовність  $i_{LA}^0$ ,  $i_{LB}^0$ ,  $i_{LC}^0$ .

Розглянемо трифазну трипровідну систему, в якій сума трьох струмів в будь-який момент часу дорівнює нулю, тобто відсутня нульова послідовність. Запишемо трифазну систему струмів навантаження, що містить  $h$ -ту гармоніку, розкладену на пряму та зворотну послідовність

$$\begin{aligned} i_{LA}^P &= I_P \cos(h\omega_1 t); & i_{LA}^N &= I_N \cos(h\omega_1 t); \\ i_{LB}^P &= I_P \cos(h\omega_1 t - 2\pi/3); & i_{LB}^N &= I_N \cos(h\omega_1 t + 2\pi/3); \\ i_{LC}^P &= I_P \cos(h\omega_1 t + 2\pi/3); & i_{LC}^N &= I_N \cos(h\omega_1 t - 2\pi/3), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $h$  — номер гармоніки;  $\omega_1$  — частота основної гармоніки.

Синтез алгоритму оцінювання проводиться в двофазній системі координат  $(d-q)$ , орієнтованій за вектором напруги мережі, що обертається синхронно з частотою  $\omega_1$ . Після перетворення вихідної трифазної системи координат АВС до синхронної системи координат  $(d-q)$  отримаємо:

$$\begin{aligned} i_{Ld}^P &= I_P \cos((h-1)\omega_1 t); & i_{Ld}^N &= I_N \cos((h+1)\omega_1 t); \\ i_{Lq}^P &= I_P \sin((h-1)\omega_1 t); & i_{Lq}^N &= I_N \sin((h+1)\omega_1 t). \end{aligned} \quad (2)$$

Таким чином синусоїдний сигнал з частотою  $h\omega_1$ , розкладений на пряму та зворотну послідовність, в системі координат  $(d-q)$  може бути представлений у вигляді

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_h \mathbf{x}(t), \text{ де } \mathbf{A}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_P & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_N \end{bmatrix}; \mathbf{A}_P = \begin{bmatrix} 0 & -h\omega_1 \\ h\omega_1 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{A}_N = \begin{bmatrix} 0 & h\omega_1 \\ -h\omega_1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{x} = (x_{dp}, x_{qp}, x_{dn}, x_{qn})^T —$$

вектор проєкцій прямої та зворотної послідовності струму навантаження на осі  $d$  і  $q$ .

Нехай струм навантаження  $i_L$  має  $N$  гармонік. Тоді струм  $i_L$  в системі координат  $(d-q)$  запишеться

$$i_{Ld} = x_{d0} + \sum_{i=1}^N (x_{dpi} + x_{dni});$$

$$i_{Lq} = x_{q0} + \sum_{i=1}^N (x_{qpi} + x_{qni}).$$
(3)

Загальна форма спостерігача для оцінювання струмів (3) має вигляд [6]

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x} + Ky,$$
(4)

де  $A = \text{blockdiag}[0, A_{h1}, \dots, A_{hN}]$ ;  $K = \begin{bmatrix} k_0 & 0 & k_1 & 0 & k_1 & 0 & \dots & k_N & 0 & k_N & 0 \\ 0 & k_0 & 0 & k_1 & 0 & k_1 & \dots & 0 & k_N & 0 & k_N \end{bmatrix}$ ,

$\hat{x} = (\hat{x}_0^T, \hat{x}_1^T, \dots, \hat{x}_N^T)^T$ ,  $y = (y_d, y_q)^T$  — вектор відфільтрованих похибок оцінювання компонент вектору струму, які визначаються як

$$\dot{y}_d = \omega_1 y_q - \frac{1}{\tau} y_d + \frac{1}{\tau} i_{Ld} - \frac{1}{\tau} \hat{i}_{Ld};$$

$$\dot{y}_q = -\omega_1 y_d - \frac{1}{\tau} y_q + \frac{1}{\tau} i_{Lq} - \frac{1}{\tau} \hat{i}_{Lq},$$
(5)

де  $\tau$  — стала часу фільтра;  $(\hat{i}_{Ld}, \hat{i}_{Lq})^T$  — компоненти оціненого вектору струму, визначеного як

$$\hat{i}_{Ld} = \hat{x}_{d0} + \sum_{i=1}^N (\hat{x}_{dpi} + \hat{x}_{dni});$$

$$\hat{i}_{Lq} = \hat{x}_{q0} + \sum_{i=1}^N (\hat{x}_{qpi} + \hat{x}_{qni}).$$

Властивість асимптотичної стійкості спостерігача (4) доведено в [6]. Структурну схему системи оцінювання зображено на рис. 2.

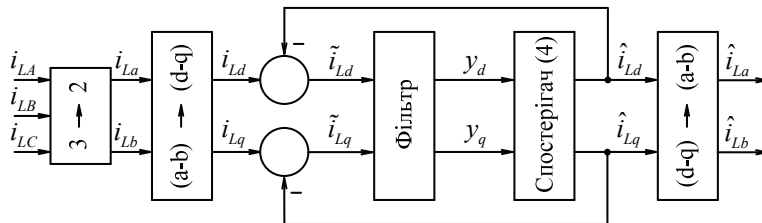


Рис. 2. Структурна схема спостерігача гармонічного складу

Експериментальні дослідження розробленого спостерігача проводилися з використанням лабораторної установки, функціональна схема якої показана на рис. 3. До складу установки входять: регульоване нелінійне навантаження на основі некерваного випрямляча з ємнісним фільтром та регульованим навантаженням (імітує вхідне коло перетворювача частоти), датчачі струму на ефекті Холла, уніфікований контролер на базі цифрового сигнального процесора (ЦСП) TMS320F28335, на якому виконана програмна реалізація спостерігача, персональний комп'ютер для програмування та візуалізації процесів.

Практична реалізація спостерігача гармонік вимагає значної об-

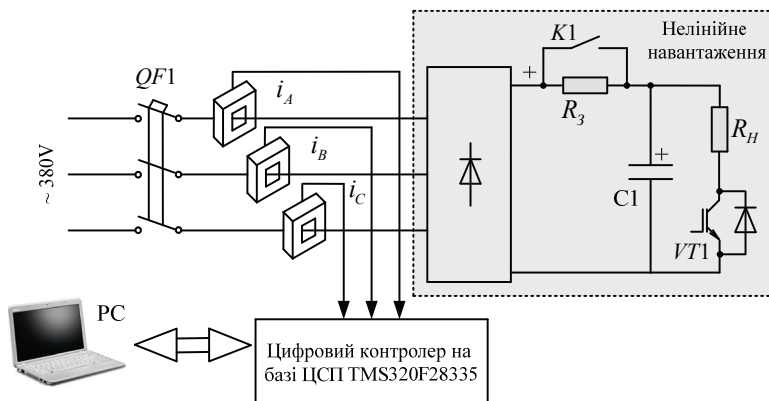


Рис. 3. Функціональна схема лабораторної установки

числювальної потужності ЦСП, оскільки з ростом кількості оцінюваних гармонік прямопропорційно зростає кількість обчислень, в той час як квантування має зменшуватися. На основі результатів тестування продуктивності ЦСП, що використовується в установці, встановлено, що реалізація спостерігача для 15 вищих гармонік струму можлива за такту квантування 75 мкс.

Під час виконання експериментів нелінійне навантаження було налаштоване так, щоб споживана з мережі потужність була рівною близько 5 кВт.

Форма фазного струму, що споживається з мережі, а також його спектр показані на рис. 4. Як видно з рис. 4, струм, що споживається з мережі, має несинусоїдальну форму і в його спектрі присутні паразитні 3, 5, 7, 9, 11, 13, 17 гармоніки.

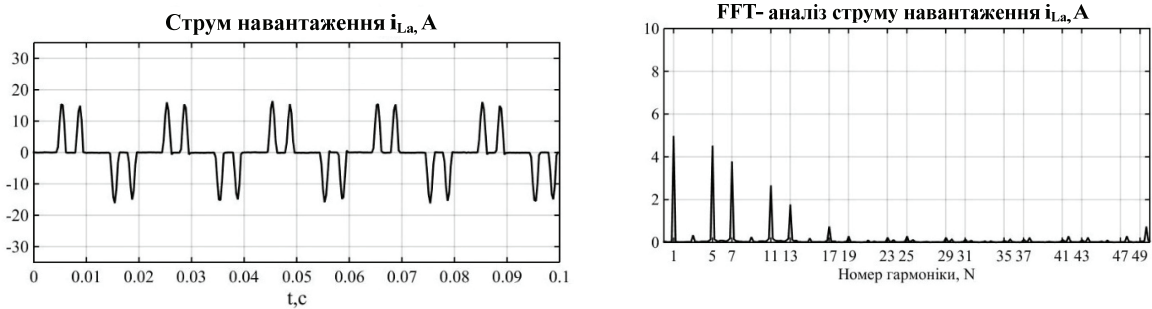


Рис. 4. Струм нелінійного навантаження

На рис. 5 показано графіки перехідних процесів похибок оцінювання гармонічних складових  $i_{Ld} - \hat{i}_{Ld}$  та  $i_{Lq} - \hat{i}_{Lq}$ , а також постійних компонент  $x_{d0}$  та  $x_{q0}$ , що відповідають першій гармоніці струму мережі. Спостерігач активується при  $t = 0,1$  с. З рис. 5 видно, що в умовах дослідження спостерігач 15 гармонік струму сходиться за час, що складає приблизно 0,5 с.

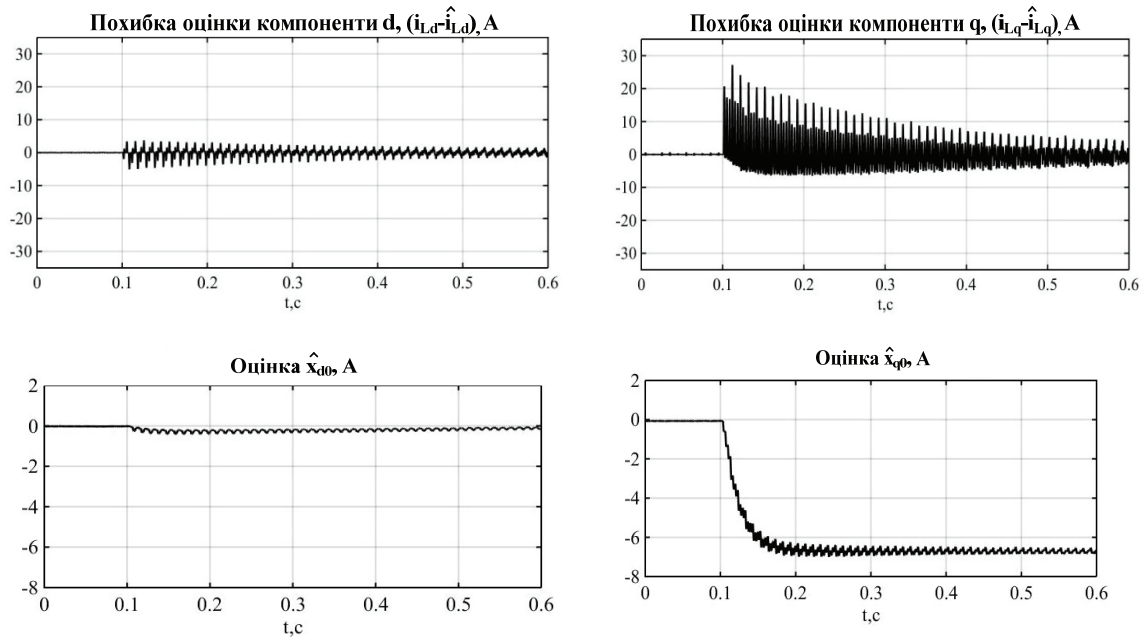


Рис. 5. Перехідні процеси похибок оцінки гармонічних складових

На рис. 6 показано форму оціненого вхідного струму навантаження, отриманого на експериментальній установці (а) та методом математичного моделювання (б). Порівнюючи графіки реальних струмів на рис. 4 та оцінок на рис. 6, встановлюємо, що запропонований спостерігач гармонік, забезпечує їх асимптотичне оцінювання, а результати моделювання з високим ступенем точності збігаються з результатами експерименту.

На рис. 7 показано форму та гармонічний склад струму, отримані відніманням оцінених значень (див. рис. 6) від вхідного струму навантаження (див. рис. 4), що відповідає імітації режиму компенсації 15 вищих гармонік за допомогою ідеального інвертора напруги.

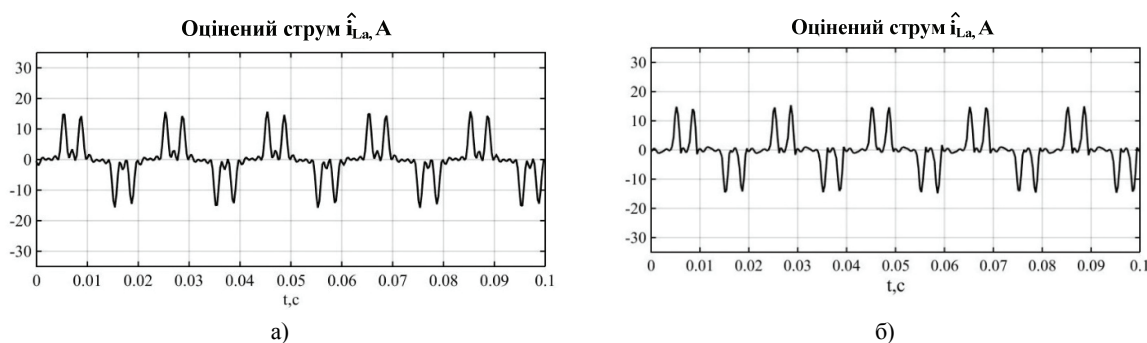


Рис. 6. Оцінений струм навантаження: результати експерименту та математичного моделювання

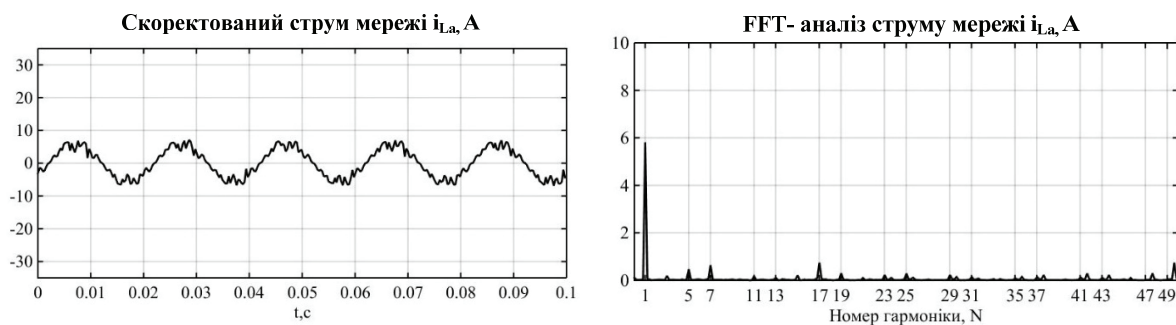


Рис. 7. Форма та гармонічний склад скоректованого струму

Порівнюючи рис. 4 та рис. 7, встановлюємо, що гармоніки з 2 по 15 суттєво послаблені. Це дало змогу отримати форму струму близьку до синусоїдальної. Залишкові спотворення зумовлені наявністю гармонік з порядком вище 16, оскільки вони, як видно з рис. 4 та 7, залишаються некомпенсованими, бо не входять в оцінений сигнал.

### Висновки

Розроблено та експериментально досліджено спостерігач гармонічного складу трифазного струму, який має властивості асимптотичної стійкості. Експериментально доведено, що синтезований спостерігач гармонічного складу струму мережі забезпечує його асимптотичне оцінювання і може бути використаний для побудови паралельних активних фільтрів. Збіг результатів експериментів з результатами математичного моделювання підтверджує достовірність виконаних досліджень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution system : a Power Quality Standard. [Dated 31 August 2010]. — London, UK : European standard, 2010. — 38 p. — ISBN: 978-0-5807-4103-6): BS EN 50160:2010.
2. Електрична енергія. Електромагнітна сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення (EN501160:2010) : ГОСТ 13109-97. — Чинний від 1999-01-01. — К : Держспоживстандарт України, 1999. — 32 с. — (Національний стандарт України).
3. Singh B. A review of active filters for power quality improvement / B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra // IEEE Trans. on Industrial Electronics. — Oct. 1999. — Vol. 46, No 5, — Pp. 960—971.
4. Akagi H. Control strategy of active power filters using multiple voltage source PWM inverters / H. Akagi, A. Nabae // IEEE Trans. On Ind. Appl. — 1986. — Vol. IA-22. — P. 460—465.
5. Makesani L. Active power filter with hybrid energy storage / L. Makesani, L. Rossetto, P. Tenti // IEEE Trans. On Ind. Electron. — 1997. — Vol. 6. — P. 392—397.
6. Наблюдатель гармонического состава трехфазного тока параллельного активного фильтра / С. М. Пересада, А. М. Митрофанов, С. П. Колесниченко, А. Н. Радюк // Технічна електродинаміка. — Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки» — 2004. — Ч. 3. — С. 99—102.
7. Fortescue C. L. Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks / Fortescue C. L. // Trans. AIEE. — Vol. 37. — Pp. 1027—1140.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 3.12.2015

**Пересада Сергій Михайлович** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: sergei.peresada@gmail.com;

**Ковбаса Сергій Миколайович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу;

**Зайченко Юрій Михайлович** — аспірант кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу;

**Дученко Артем Юрійович** — студент факультету електроенерготехніки і автоматики.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

**S. M. Peresada<sup>1</sup>**  
**S. M. Kovbasa<sup>1</sup>**  
**Yu. M. Zaichenko<sup>1</sup>**  
**A. Yu. Duchenko<sup>1</sup>**

## Three-phase Current Harmonic Stuff Estimator for Shunt Active Power Filters

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

*The results of design and experimental investigation of harmonic stuff estimator for three-phase network have been presented in this paper. There has been proposed the estimator based on isolation of positive and negative sequences of each harmonics. The designed estimator provides asymptotic estimation of harmonic stuff. The properties of proposed solution have been confirmed by experiments and simulations.*

**Ключові слова:** shunt active power filter, estimator, high-order harmonics, electricity quality, non-linear loads.

**Peresada Sergii M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drive, e-mail: sergei.peresada@gmail.com;

**Kovbasa Sergii M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drive;

**Zaichenko Yurii M.** — Post-Graduate Student of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drive;

**Duchenko Artem Yu.** — Student of the Faculty of Electric Power Engineering and Automation

**С. М. Пересада<sup>1</sup>**  
**С. М. Ковбаса<sup>1</sup>**  
**Ю. М. Зайченко<sup>1</sup>**  
**А. Ю. Дученко<sup>1</sup>**

## Наблюдатель гармонического состава трехфазного тока для параллельных активных фильтров

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

*Представлены результаты разработки и экспериментального тестирования наблюдателя гармонического состава трехфазного тока сети питания. Предложенный наблюдатель базируется на концепции разделения каждой гармоники на положительную и отрицательную последовательность. Разработанный наблюдатель обеспечивает асимптотическое оценивание гармонического состава тока сети, что подтверждается путем математического моделирования и экспериментального исследования*

**Ключевые слова:** параллельный активный фильтр, наблюдатель, высшие гармоники, качество электроэнергии, нелинейная нагрузка.

**Пересада Сергей Михайлович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации электромеханических систем и электропривода, sergei.peresada@gmail.com;

**Ковбаса Сергей Николаевич** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода;

**Зайченко Юрий Михайлович** — аспирант кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода;

**Дученко Артем Юрьевич** — студент факультета электроенерготехники и автоматики