

С.М. Пересада*, докт. техн. наук, Ю.М. Зайченко**, В.М. Пижов***, канд. техн. наук
НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: sergei.peresada@gmail.com

В роботі запропоновано новий метод налаштування спостерігачів вищих гармонік струму задля селективного виявлення спотворень. Встановлено залежність між коефіцієнтами налаштування спостерігача та швидкодією оцінювання і наявністю властивостей селективності. Представлено результати математичного моделювання, які підтверджують теоретичні висновки, а також демонструють ефективність запропонованого рішення для паралельних силових активних фільтрів із селективною компенсацією гармонік струму. Бібл. 8, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: силовий активний фільтр, вищі гармоніки, спостерігач, селективність.

Вступ. Робота сучасного електротехнічного обладнання тісно пов'язана з тим, що його функціонування призводить до появи гармонічних спотворень в мережах живлення. Питання гармонічного спотворення на даний час досить глибоко вивчене, а для компенсації цих спотворень запропоновано різні підходи [1], [2], які знайшли своє застосування в серійних силових активних фільтрах. Проте розробка силового активного фільтра досі відзначається високою складністю, оскільки для повноцінного виявлення гармонічних спотворень та їхньої подальшої компенсації вимагає високих обчислювальних потужностей керуючого контролера, значних вимог до силової електроніки, вимірювальних пристроїв, що, як наслідок, призводить до зниження масогабаритних показників виробу і значної кінцевої вартості.

Якість електричної енергії мережі характеризується певними допустимими значеннями параметрів, які регламентуються спеціалізованими нормативними документами, наприклад [3]. Одним з підходів до підвищення якості електричної енергії мережі, спрямованим на забезпечення параметрів електричної енергії цим стандартам, а також досягнення цієї мети з використанням якомога менших ресурсів, є селективна компенсація гармонік [4]. Відповідно до цього підходу компенсації підлягають лише найкритичніші гармонічні складові, що значно спрощує реалізацію активного фільтра.

Для оцінювання гармонічного складу струму навантаження в [5] запропоновано загальнотекстурну структуру спостерігача Люенбергера, який завдяки резонансним властивостям потенційно забезпечує селективне виявлення гармонік. Проте, дослідження динаміки спостерігача не проводилося, методів налаштування матриці зворотних зв'язків для забезпечення селективності не надано. В [6], [7] вперше представлено результати дослідження динамічних властивостей спостерігачів такої структури, з яких слідує, що за рекомендованого в [5] налаштування з однаковими коефіцієнтами демпфування для усіх гармонік існує протиріччя. Показано, що зниження рівня демпфування задля підсилення властивостей селективності призводить до втрати швидкодії оцінювання. Додатково критичним, з точки зору цифрової реалізації, є наявність «слабо» демпфованих полюсів спостерігача для «малих» значень коефіцієнтів демпфування, які необхідні для забезпечення високого рівня селективності. В системах з наперед відомими важливими для компенсації частотами гармонічних складових такий метод налаштування спостерігача не є раціональним. Тому пошук компромісу між швидкістю та селективністю оцінювання є актуальною задачею, яку неможливо розв'язати аналітичними методами, наприклад, оптимізацією лінійних систем, високим порядком спостерігача (200 – для оцінки 50 гармонік) та специфікою оцінювання гармонік в резонансному режимі.

Метою даної роботи є розробка нового методу налаштування спостерігачів гармонік, який дає змогу досягти компромісу між швидкістю та властивостями селективності оцінювання, завдяки чому суттєво збільшуються необхідні значення коефіцієнтів демпфування і за рахунок цього спрощується реалізація спостерігачів в реальному часі.

Спостерігач гармонік. У [5] показано, що згідно з методом гармонічних складових Фортеск'є струм навантаження $\mathbf{i}_L = (i_{Ld}, i_{Lq})^T$, який має N гармонік в системі координат $(d-q)$, орієнтований за вектором напруги мережі, може бути записаний у вигляді

$$i_{Ld} = \sum_{i=1}^N (x_{dpi} + x_{dni}), \quad i_{Lq} = \sum_{i=1}^N (x_{qpi} + x_{qni}), \quad (1)$$

© Пересада С.М., Зайченко Ю.М., Пижов В.М., 2020

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-8948-722X>, ** <https://orcid.org/0000-0002-2933-7737>,

*** <https://orcid.org/0000-0001-6437-4405>

де $\mathbf{x}_i = (x_{dpi}, x_{qpi}, x_{dni}, x_{qni})^T$ – вектор проєкцій прямої (позначено індексом p) та зворотної (позначено індексом n) послідовностей i -ї гармоніки струму навантаження. Для оцінювання гармонічних складових у виразах для струмів (1) у [5] запропоновано спостерігач Люєнбергера, загальна форма якого має вигляд

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_h \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{K}_h [\mathbf{i}_L - \mathbf{C}_h \hat{\mathbf{x}}], \quad (2)$$

де $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{\mathbf{x}}_1^T, \dots, \hat{\mathbf{x}}_N^T)^T$, $\hat{\mathbf{x}}_1 = (\hat{x}_{dp1}, \hat{x}_{qp1}, \hat{x}_{dn1}, \hat{x}_{qn1})^T$, $\hat{\mathbf{x}}_N = (\hat{x}_{dpN}, \hat{x}_{qpN}, \hat{x}_{dnN}, \hat{x}_{qnN})^T$, $\mathbf{K}_h = [\mathbf{K}_{h1}, \dots, \mathbf{K}_{hN}]^T$, $\mathbf{A}_h = \text{blockdiag}[\mathbf{A}_{h1}, \dots, \mathbf{A}_{hN}]$, $\mathbf{C}_h \in \mathbb{R}^{2 \times 4N}$,

$$\mathbf{K}_{h1} = \begin{pmatrix} -k_{1h} & -k_{2h} \\ k_{2h} & -k_{1h} \\ -k_{1h} & k_{2h} \\ -k_{2h} & -k_{1h} \end{pmatrix}, \mathbf{K}_{hN} = \begin{pmatrix} -k_{1N} & -k_{2N} \\ k_{2N} & -k_{1N} \\ -k_{1N} & k_{2N} \\ -k_{2N} & -k_{1N} \end{pmatrix}, \mathbf{A}_{h1} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_m & 0 & 0 \\ \omega_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_m \\ 0 & 0 & -\omega_m & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{A}_{hN} = \begin{pmatrix} 0 & -N\omega_m & 0 & 0 \\ N\omega_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N\omega_m \\ 0 & 0 & -N\omega_m & 0 \end{pmatrix},$$

де ω_m – кутова частота першої гармоніки; $k_{11} \dots k_{1N}$ – коефіцієнти зворотних зв'язків спостерігача, які обираються так, щоб забезпечити коефіцієнт демпфування δ та власну частоту коливань $\omega_n = (1 - 2\delta^2)^{-1/2} h \omega_m$, а саме: $k_{1h} = \delta \omega_n$, $k_{2h} = [\omega_n^2 - (h \omega_m)^2] / 2h \omega_m$, h – номер гармоніки в системі координат (d-q). Згідно з [5], значення δ встановлюється однаковим для всіх гармонік. Спостерігач (2) забезпечує асимптотичне оцінювання всіх N гармонік або будь-яку наперед визначену їхню кількість з властивостями селективності, що досягається відповідним налаштуванням матриці коефіцієнтів зворотних зв'язків $\mathbf{K}_h$ шляхом завдання значення δ .

Для дослідження чутливості спостерігача гармоніки з частотою ω_N до наявності сторонніх гармонік у спектрі та встановлення властивостей селективності побудовано амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) спостерігача (2), яку представлено у відносних одиницях на рис. 1 для значень коефіцієнтів демпфування $\delta = 0.02$, $\delta = 0.01$, $\delta = 0.001$. АЧХ побудовано як реакцію спостерігача на сигнали $i_{Ld} = 1 \cdot \sin(\omega_n t)$, $i_{Lq} = 1 \cdot \cos(\omega_n t)$, частота ω_n яких повільно змінювалася в часі. Значення $|\tilde{i}| = f(t)$ було перераховано у

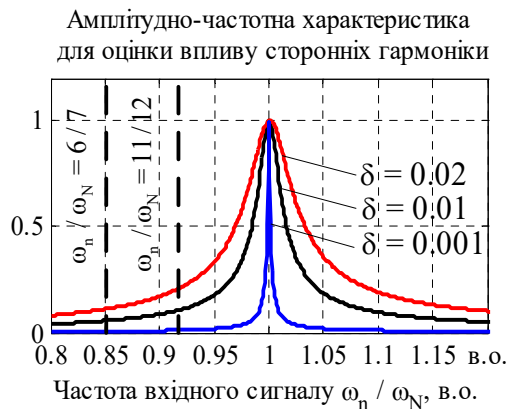


Рис. 1

залежність $|\tilde{i}| = f(\omega_n / \omega_N)$, $|\tilde{i}|$ – модуль похибки оцінювання.

З рис. 1 випливає, що зі збільшенням коефіцієнта δ значно розширюється полоса резонансу, що в результаті може призводити до хибного оцінювання гармонічного складу. З іншого боку, за умов зростання заданої частоти оцінювання для однакового коефіцієнту демпфування δ зростає чутливість спостерігача і до сторонніх гармонік, зокрема до сусідніх, що проявляється у збільшенні величини похибки оцінювання. Це зумовлює необхідність забезпечити вузьку полосу резонансу спостерігача для гармонік вищого порядку, оскільки полоса резонансу спостерігача може охопити частоти, що знаходяться на ще більшій відстані, ніж сусідня. Гармоніки нижчого порядку (з порядком до 5-го) не вимагають вузької полоси резонансу, оскільки є слабо чутливими до наявності

сторонніх гармонік в спектрі, як це випливає з рис. 1. Наприклад, для коефіцієнта демпфування $\delta = 0.01$ спостерігача 12-ї гармоніки наявність 11-ї гармоніки в спектрі струму навантаження (у відносних одиницях $\omega_n / \omega_N = 0.91$ на рис. 1) призведе до появи похибки оцінювання приблизно 10%, в той час, як за значення коефіцієнта затухання $\delta = 0.001$ величина похибки становить менше 2%.

Налаштування спостерігача гармонік. В симетричних трипровідних трифазних мережах наявність парних гармонік та гармонік, кратних трьом, є нехтувано малою [4], [8], і, за певних припущень, можна вважати, що такі гармоніки відсутні у спектрі струму навантаження, а отже не спричинятимуть появи похибок оцінювання. Зокрема, як показано у [8], трифазні споживачі електроенергії, побудовані на основі 6-пульсних схем, являються джерелами гармонік з порядком $6k \pm 1$, $k \in \mathbb{Z}$, k – номер гармоніки трифазної мережі. Сучасні векторно-керовані та частотні електроприводи електричних двигунів, які побудовано на основі 6-пульсного випрямляча з проміжною ланкою постійного струму, є типовими і найбільш розповсюдженими споживачами електроенергії. За таких припущень селективне виявлення і пода-

льша компенсація так званих канонічних гармонік з порядком 5, 7, 11, 13, 17 та 19 забезпечать відповідність якості електричної енергії вимогам регулюючих документів.

Конструювання спостерігача відбувається в синхронній системі координат (d-q), при переході до якої із системи координат (a-b) має місце зсув частот, тому гармоніки прямої послідовності набувають меншого порядку, а гармоніки зворотної послідовності – вищого порядку. За рахунок цього з'являється можливість налаштувати спостерігачі 6-ої, 12-ої та 18-ої гармоніки на оцінювання одночасно 5-ої і 7-ої, 11-ої і 13-ої та 17-ої і 19-ої гармоніки відповідно. Враховуючи чутливість спостерігача гармонік до наявних у спектрі інших гармонічних складових відповідно до рис. 1 та припущення про відсутність у спектрі парних гармонік і гармонік, кратних трьом, мету досліджень можна тепер перефразувати у наступному вигляді: знайти максимально допустимий коефіцієнт затухання δ спостерігача гармоніки з порядком k , який забезпечить оцінювання гармонік з порядком $k+6$ та $k-6$ з точністю, що не перевищує задану.

Порядок гармоніки в трифазній системі координат	5, 7	11, 13	17, 19
Порядок спостерігача в системі координат (d-q)	6	12	18
δ	0.145	0.035	0.027

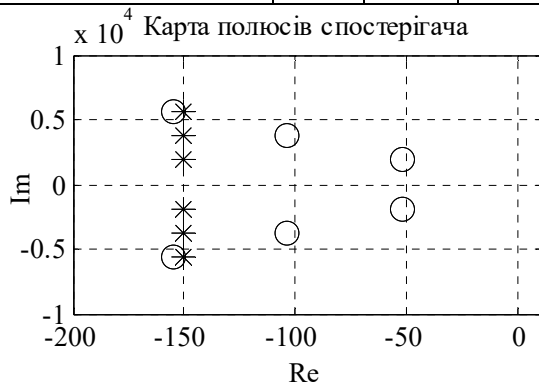


Рис. 2

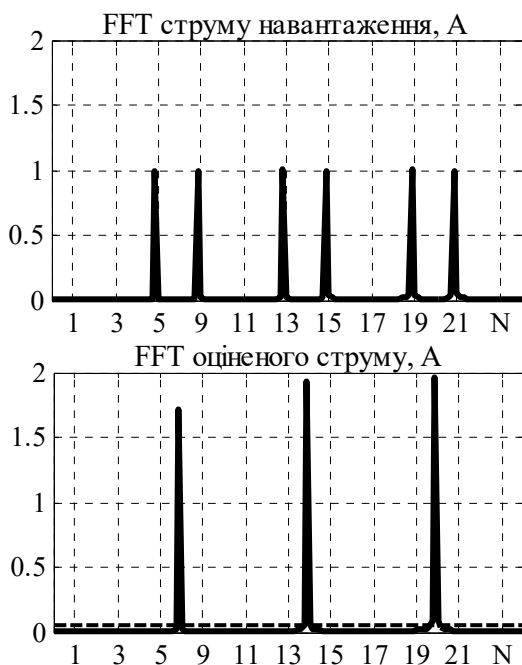


Рис. 3

Результати математичного моделювання. Для дослідження впливу коефіцієнта затухання δ на властивості селективності спостерігача гармоніки з порядком k приймається, що ця гармоніка була відсутня в спектрі, а сусідні збуджуючі гармоніки присутні. Було прийнято, що коефіцієнт демпфування δ спостерігача гармоніки з порядком k вважається прийнятним в тому випадку, коли похибка оцінювання, яка обумовлена присутністю сусідніх гармонік, не перевищує 5%. На основі отриманих коефіцієнтів демпфування, значення яких представлено у таблиці, формується матриця зворотних зв'язків спостерігача $\mathbf{K}_h$.

Таким чином сутність запропонованого методу налаштування спостерігача полягає в тому, що, на відміну від стандартного налаштування [5] – [7], значення коефіцієнта демпфування δ не є постійним для усіх гармонік, а залежить від їхнього номеру. Полюси спостерігачів гармонік за такого метода налаштування для похибки оцінювання 5% розташовуються на однаковій відстані $r = 150$ від уявної осі на комплексній площині, як це показано на рис. 2 (позначено символом «*»). Еквідистентне відносно уявної осі комплексної площини розташування полюсів гарантує, що оцінка кожної гармоніки затухає з однаковою швидкістю, в той час як значення коефіцієнта демпфування зменшується зі збільшенням порядку гармоніки. Для порівняння, на рис. 2 також представлено розташування полюсів для стандартного налаштування з однаковим постійним $\delta = 0.027$ для всіх гармонік (позначено символом «o»), звідки видно, що швидкість оцінювання у цьому разі менша. З точки зору теорії спостерігачів розроблений метод показує, що розрахунок коефіцієнтів налаштування матриці зворотних зв'язків $\mathbf{K}_h$ спостерігача (2) доцільно виконувати, виходячи з еквідистентного розташування полюсів спостерігача на комплексній площині. Сформувавши задане розташування полюсів спостерігача у вигляді

$\mathbf{P} = (-r - j\omega_{nh}, -r + j\omega_{nh}, -r + j\omega_{nh}, -r - j\omega_{nh})^T$, проводиться розрахунок коефіцієнтів k_1, k_2 матриці $\mathbf{K}_h$ спостерігача (2) за допомогою програмних засобів автоматизованого проектування систем керування, наприклад, в середовищі MatLab. Відмітимо, що кількість «слабо» демпфованих полюсів спостерігача за умови запропонованого налаштування зменшилася,

що спрощує його програмну реалізацію.

Тестування системи у разі налаштування спостерігачів 6-ої, 12-ої та 18-ої гармоніки на основі значень коефіцієнтів затухання δ , представлених у таблиці, проведено за наступних умов. Гармонічний склад струму навантаження представлений в системі координат (a-b) гармоніками прямої (7, 13, 19) та зворотної (5, 11, 17) послідовно-

стей одиничної амплітуди. На рис. 3 показано FFT струму трифазної мережі, FFT оцінених гармонік в системі координат (d-q). Перехідні процеси оцінювання для стандартного налаштування з постійним $\delta = 0.027$ (рис. 4, а) і запропонованим відповідно до значень у таблиці показано на рис. 4, а та рис. 4, б. Графіки перехідних процесів підтверджують підвищення швидкодії спостерігача за умов збереження властивостей селективності.

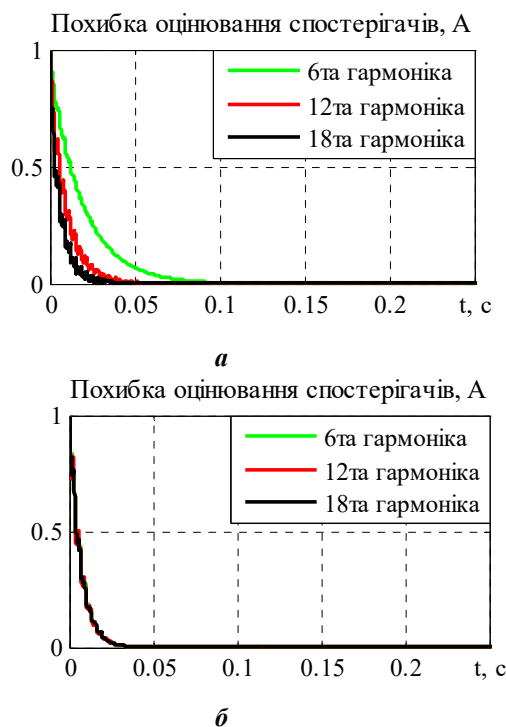


Рис. 4

Висновки. Запропоновано новий метод налаштування спостерігача гармонік, який забезпечує підвищену швидкодію оцінювання гармонічного складу струму мережі та селективність оцінювання. Встановлено залежність цих показників від значення коефіцієнтів демпфування для кожної з оцінюваних гармонік. Отримані в такий спосіб коефіцієнти налаштування спостерігача значно спростують його технічну реалізацію за рахунок зменшення вимог до обчислювальних потужностей керуючого контролера. Результати дослідження формують концептуально новий підхід до проектування матриці зворотних зв'язків спостерігача, виходячи з евідентного розташування полюсів, що є внеском до теорії спостерігачів резонансного типу.

1. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. Wiley-IEEE Press, 2017. 472 p
2. Liu H., Hu H., Chen H., Zhang L., Xing Y. Fast and Flexible Selective Harmonic Extraction Methods Based on the Generalized Discrete Fourier Transform. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33. No 4. Pp. 3484-3496.
3. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std 519-2014*. 11 June 2014. Pp.1-29.
4. Kumar D., Zare F. Harmonic analysis of grid connected power electronic systems in low voltage distribution networks. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2016. Vol. 4. No 4. Pp. 70-79.
5. Ronchi F., Tilli A. Three-phase positive and negative sequences estimator to generate current reference for selective active filters. *Proc IEEE Mediterranean conference on Control and Automation. MED'2002*. Lisbon, 2002.
6. Peresada S.M., Mykhalskyi V.M., Zaichenko Y.M., Kovbasa S.M. Selective and adaptive harmonics estimation for three-phase shunt active power filters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 29-38. DOI: 10.15407/tehnied2020.05.015.
7. Peresada S., Zaichenko Y., Kovbasa S., Nikonenko Y. Three-phase current harmonics estimation for shunt active power filters. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES-2017)*. 2017. Pp. 272-275. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248908.
8. ABB DRIVES. Technical guide No 6. Guide to harmonics with AC drives. AFE64292714 REV F EN 27.11.2017.

УДК 621.314.5

СЕЛЕКТИВНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ

С.М. Пересада, докт. техн. наук, Ю.М. Зайченко, В.М. Пыжов, канд. техн. наук.

НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: sergei.peresada@gmail.com

В работе предложен новый метод настройки наблюдателей высших гармоник тока для селективного обнаружения искажений. Установлена зависимость между коэффициентом настройки наблюдателя и быстродействием оценивания и наличием свойств селективности. Представлены результаты математического моделирования, которые подтверждают теоретические выводы, а также демонстрируют эффективность предложенного решения для параллельных активных фильтров с селективной компенсацией гармоник тока. Библ. 8, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: силовой активный фильтр, высшие гармоники, наблюдатель, селективность.

SELECTIVE ESTIMATION OF THREE-PHASE CURRENT HARMONICS

S. Peresada, Y. Zaichenko, V. Pyzhov

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: sergei.peresada@gmail.com

In the paper a new method of current harmonics observers configuration for selective detection of distortions is proposed. The relationship between the observer tuning factor and the speed of the estimation and the presence of selectivity properties is obtained. Simulation results confirms theoretical findings and demonstrate the effectiveness of the proposed solution for shunt active power filters with selective harmonics compensation. References 8, figures 4, table 1.

Key words: active power filter, higher-order harmonics, observer, selectivity.

Надійшла 28.02.2020
Остаточний варіант 18.04.2020