УДК 621.317: 621.313.3 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.03.073

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЦИФРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ПІД ЧАС КОРЕКЦІЇ ФОРМИ СТРУМУ В МЕРЕЖАХ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЖИВЛЕННЯ

П.П. Подейко[*], канд. техн. наук, **В.М. Губаревич**[**], канд. техн. наук, **В.Г. Гребенюк**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна, **e-mail: ppodeiko@ied.org.ua.**

Пропонується використання цифрового режекторного фільтра для формування опорного компенсаційного сигналу паралельного однофазного активного фільтра гармонік струму, що відрізняється простотою та гнучкістю у порівнянні з відомими методами під час його технічної реалізації. Виконано математичне моделювання цифрового фільтра у середовищі Matlab та наведено результати практичної реалізації фільтро-компенсуючого пристрою, що підтверджує основні теоретичні результати дослідження. Бібл. 8, рис. 6.
Ключові слова: альтернативні джерела живлення, нелінійне навантаження, цифровий фільтр, коректор форми струму, опорний сигнал, сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень.

Постановка проблеми. За останні роки внаслідок перебоїв централізованого електропостачання все більше альтернативних джерел живлення використовується в промислових мережах електропостачання, таких як гідро-, вітро- та сонячні електростанції, паливні електрогенератори, системи безперебійного живлення тощо. Проте питання забезпечення електромагнітної сумісності і нормованих показників якості напруги за гармонійним складом, несиметрією напруг та коливанням рівня напруги в даних системах електропостачання на сьогодні залишається актуальним. Споживачі електроенергії в таких мережах широко використовують сучасне перетворювальне обладнання, у тому числі перетворювачі частоти для живлення асинхронних електродвигунів, тиристорні регулятори, імпульсні джерела живлення та ін., форма споживаного струму яких суттєво відрізняється від синусоїди, внаслідок чого спотворюється форма напруги електропостачання, а показники якості електроенергії за гармоніками погіршуються [1]. Вищі гармоніки струму в альтернативних системах живлення з низькими струмами короткого замикання є причиною перевитрати пального та перегріву генераторів, спрацювання кіл захисту систем автоматики автономних інверторів, зниження коефіцієнта потужності даних джерел живлення, тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазвичай задачу зменшення гармонійних спотворень вхідного струму джерел живлення електроустановок та підвищення якості електричної енергії вирішують за допомогою простих та надійних пасивних фільтрів. Однак такі проблеми, як труднощі з налаштуванням фільтрів, небезпека виникнення резонансних явищ та неефективність компенсації реактивної потужності у широкому діапазоні навантажень змусили дослідників шукати альтернативи, що призвело до появи різних типів фільтрів активної потужності – паралельні, послідовні та гібридні [2].

В основу активної корекції форми струму покладено принцип паралельного включення керованого джерела реактивної потужності, струм i_C якого (рис. 1) направлений зустрічно миттєвому значенню струму нелінійного навантаження i_L, даючи змогу джерелу живлення працювати лише на основній складовій струму [3].

Формування сигналів керування будь-якого фільтрокомпенсуючого пристрою (ФКП) є непростою задачею. Характеристики таких паралельних коректорів форми струму великою мірою залежать від методу формування сигналів керування. Ці методи можна розділити на дві групи [4].

До першої групи відносять методи формування сигналів керування у частотній області, які базуються на представленні несинусоїдальних струмів і напруг у вигляді ряду Фур'є.

Основні недоліки цих методів полягають у наступному:

– потрібна попередня аналогова фільтрація для того, щоб виключити накладання спектрів сигналів;

© Подейко П.П., Губаревич В.М., Гребенюк В.Г., 2026
ORCID: [*] https://orcid.org/0000-0001-9201-102X; [**] https://orcid.org/0000-0003-2416-9858
© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

– робота самого фільтра вносить додаткові амплітудні та фазові спотворення;

– сигнал, який аналізується, має бути стаціонарним, що на практиці неможливо забезпечити.

Методи формування сигналів керування в області часу засновані на формуванні компенсуючих сигналів із миттєвих значень струмів і напруг мережі. Завдяки більшій швидкодії вони набули значного поширення.

Для формування керуючих сигналів у часовій області використовують метод миттєвої реактивної потужності та методи, в основу яких покладено використання цифрового оброблення сигналів і штучних нейронних мереж.

Метод миттєвої реактивної потужності ґрунтується на обчисленні миттєвих значень величин, тому й отримав таку назву. Ці величини містять постійні та змінні складові. У разі, якщо напруга має синусоїдальну форму, змінна складова миттєвої потужності визначається гармоніками струму, споживаного нелінійним навантаженням. Керуючий сигнал можна отримати, виділяючи змінну складову миттєвої потужності за допомогою фільтра верхніх частот [5].

Хоча видається можливим впровадження систем керування на основі *p-q* теорії для однофазних активних фільтрів [6], однак здебільшого цей метод використовують виключно в трифазних ФКП, що є його недоліком.

Керування характеристиками активного коректора форми струму (АКФС) із застосуванням технології цифрової обробки сигналів дає змогу використовувати різноманітні добре розроблені методи спектрального оцінювання сигналів та компенсації завад [7] на базі ефективних та недорогих високопродуктивних цифрових процесорів. Тому цей напрямок є досить перспективним та інтенсивно розвивається, а питання щодо застосування методів цифрової обробки сигналів для керування характеристиками активних фільтрокомпенсуючих пристроїв (АФКП) в енергетиці залишаються невирішеними.

Спектральний склад сигналу, що формується системою керування АФКП, має збігатися з гармонійним складом синусоїдального струму, що генерується нелінійним навантаженням. Задля отримання такого сигналу можна використовувати аналоговий режекторний фільтр, налаштований на частоту основної гармоніки [7]. Однак імплементація аналогових методів фільтрації сигналів має серйозні недоліки, пов'язані з тим, що такий фільтр є статичним пристроєм і його характеристики не можуть змінюватися під час зміни амплітуди та частоти основної гармоніки.

Тому **метою роботи** є формування опорного компенсаційного сигналу однофазного АКФС на основі цифрового режекторного фільтра, що дає змогу автоматично змінювати його параметри як на локальному рівні, так і віддалено за допомогою серверних алгоритмів обробки даних під час зміни спектрального складу несинусоїдальних струмів нелінійного навантаження.

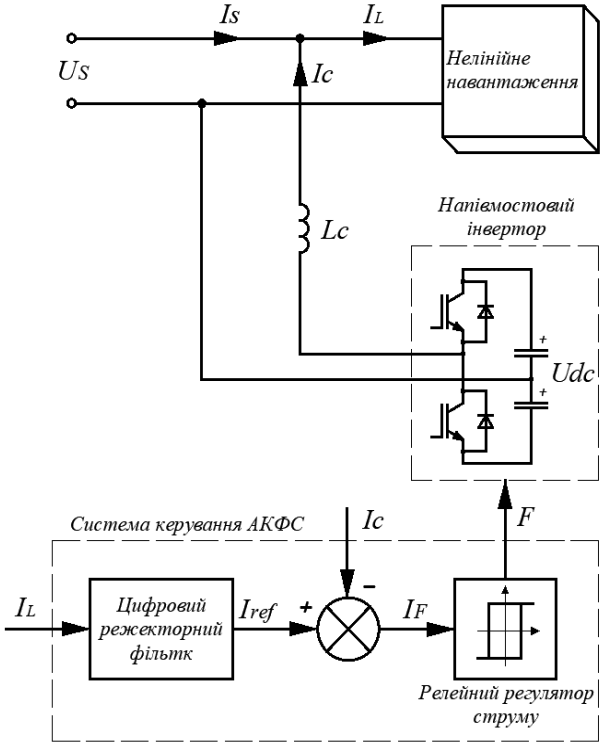

Рис. 1

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо структурну схему АКФС з використанням цифрового режекторного фільтра, що наведена на рис. 1. Нелінійне навантаження (в даному випадку випрямляюче навантаження – випрямляч з ємнісним фільтром) споживає несинусоїдальний струм I_L від однофазного джерела змінного струму, до складу якого входять як основна, так і вищі гармоніки. Але введення в однофазну мережу активного коректора струму, як показано на рис. 1, формує такий компенсаційний струм I_C, що в сумі зі струмом навантаження забезпечує споживання з джерела живлення струму I_S синусоїдальної форми. На вхід цифрового режекторного фільтра поступає струм навантаження I_L, який в моменти дискретизації фільтра відфільтровує основну гармоніку, пропускаючи інші вищі гармоніки без змін, генеруючи опорний сигнал I_{ref}. Цей відфільтрований сигнал I_F є опорним сигналом гістерезисного регулятора струму, що

разом з силовим інвертором визначає форму компенсаційного струму I_C.

$$I_s = I_L + I_C . \tag{1}$$

Рівняння (1) можна реалізувати на мікропроцесорному рівні під час реалізації цифрового фільтра, який має вузьку смугу пропускання. Передавальна функція неінвертуючого симетричного режекторного фільтра [8] має вигляд (2)

$$W(p) = \frac{p^2 + \omega_C^2}{p^2 + \beta p + \omega_C^2}, \tag{2}$$

де p – оператор Лапласа; ω_C – частота зрізу; β – ширина смуги режекції.

Для частоти мережі f_C = 50 Гц, $\omega_C = 2\cdot\pi\cdot f_C$ = 314 рад/с β = 25 вибирається таким чином, щоб необхідна крутизна задовольняла критеріям стабільності та бажаному відгуку режекторного фільтра [8].

Тоді передавальна функція набуває вигляду

$$W(p) = \frac{p^2 + 314_C^2}{p^2 + 25p + 314_C^2} . \tag{3}$$

Таким чином, добротність запропонованого режекторного фільтра становить $Q=\omega_C/\beta$=12,56, що є достатнім для ефективного послаблення частотної складової на даній частоті зрізу.

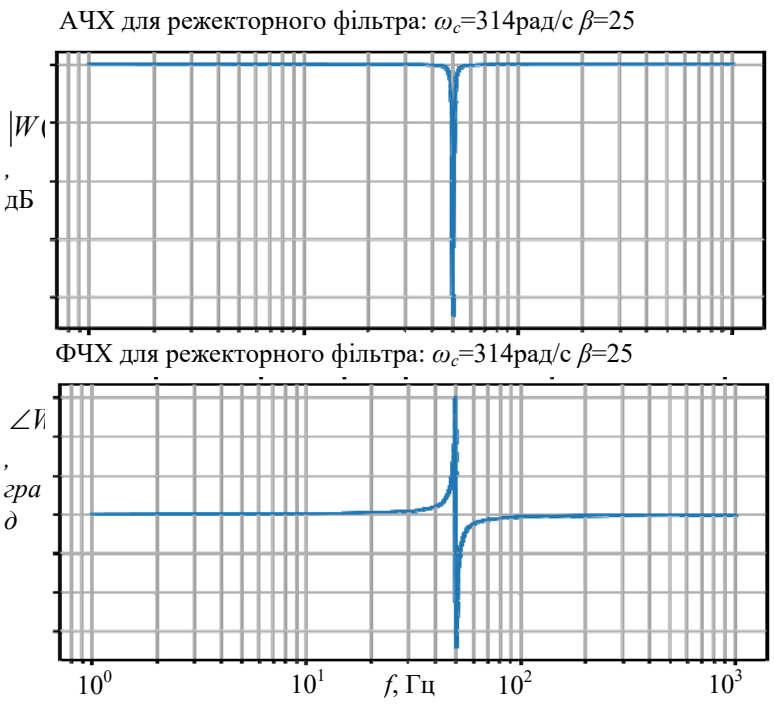

Рис. 2

Амплітудно-частотна характеристика на рис. 2 показує, що фільтром сильно послаблюється тільки основна частотна складова (f_C = 50 Гц), інші проходять без змін.

Цифрова реалізація є найкращим способом досягти точного налаштування параметрів фільтра. Для переходу з системи безперервного часу в систему дискретного часу використовується білінійне перетворення. Метод білінійного z-перетворення полягає у наступному: в операторній передавальній функції виконується заміна оператора p на оператор $k\cdot(1 - z^{-1}) / (1 + z^{-1})$ внаслідок чого функція з p-області переходить у z-область

$$p_z = k \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}, \quad k = 2f_s, \tag{4}$$

де f_S – частота дискретизації.

Тепер для білінійного перетворення (3) візьмемо частоту дискретизації 5кГц і, підставивши у (4), отримаємо

$$W(z) = \frac{0{,}9957 - 1{,}9911z^{-1} + 0{,}9957z^{-2}}{1 - 1{,}9911z^{-1} + 0{,}9950z^{-2}} = \frac{Y(z)}{X(z)}, \tag{5}$$

$$Y(z) = 0{,}9957(z) - 1{,}9911z^{-1}X(z) + 0{,}9957z^{-2}X(z) + 1{,}9911z^{-1}Y(z) - 0{,}9950^{-2}Y(z) . \tag{6}$$

Використовуючи обернене Z-перетворення, отримаємо необхідне диференціальне рівняння режекторного фільтра

$$y(k) = 0{,}9957x(k) - 1{,}9911x(k-1) + 0{,}9957x(k-2) + 1{,}9911y(k-1) - 0{,}9950y(k-2) . \tag{7}$$

Релейний регулятор струму формує відповідний струм коректора I_C такий самий за формою, як і опорний сигнал, що отримується на виході режекторного фільтра, з точністю ширини петлі гістерезису релейного елемента 1,2 А.

На рис. 3 наведено загальну імітаційну модель АКФС в середовищі моделювання MATLAB Simulink, що складається з однофазного генератора змінного струму напругою 220 В частотою 50 Гц з внутрішнім опором 0,003 Ом та індуктивністю 25 мГн, який живить перетворювач частоти – нелінійне випрямляюче навантаження зі значною величиною ємності C_L = 560 мкФ в шині постійного

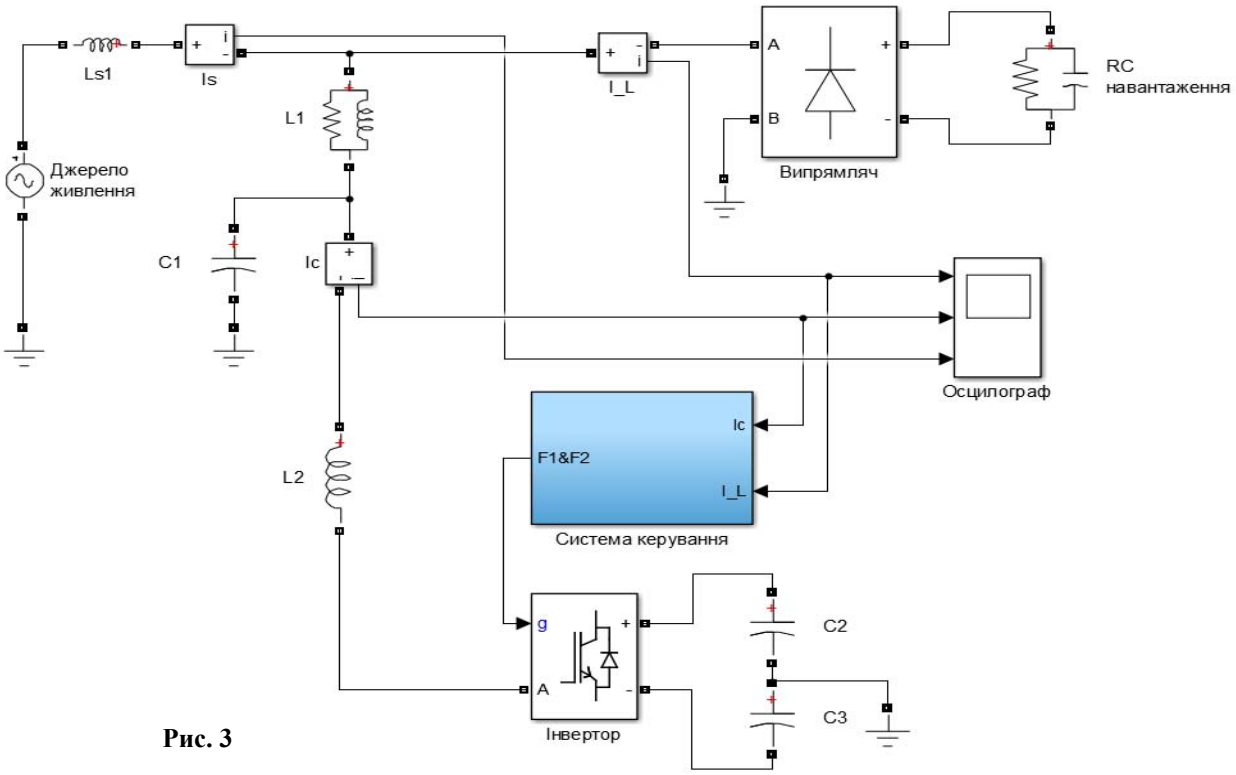

Рис. 3

струму та активним опором R_L = 30 Ом. Індуктивність вхідного дроселя коректора $L1$ 5 мГн, а його активний опір становить 3 Ом. Ємність конденсаторів силового інвертора становить 680 мкФ. Початкові умови: частота джерела живлення 50 Гц, амплітуда вхідної напруги 310 В, вихідна напруга нелінійного навантаження 310 В. Модель системи керування фільтрокомпенсуючого пристрою показана на рис. 4.

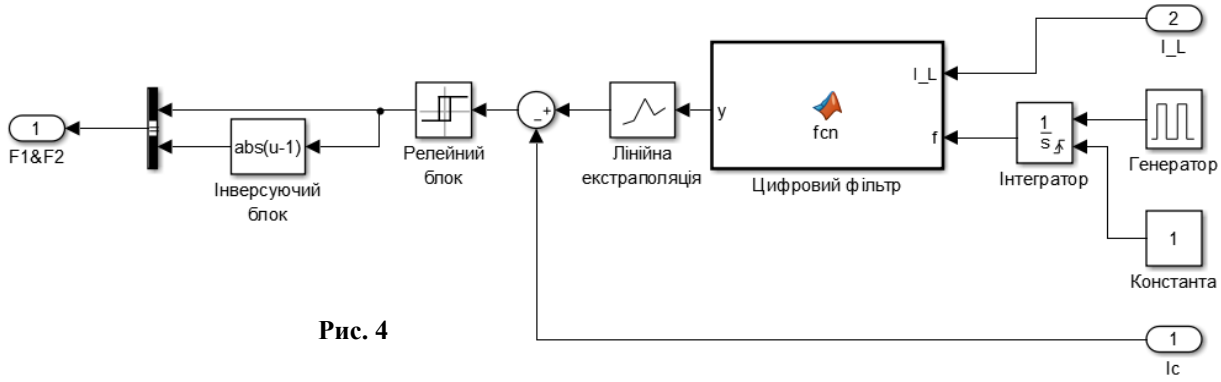

Рис. 4

Результати моделювання за максимального струму нелінійного навантаження 30 А наведено на рис. 5.

В результаті моделювання загальний коефіцієнт гармонійних спотворень за струмом джерела живлення зменшився з 35,20% до 4,0 % після того, як активний коректор струму компенсував гармоніки струму, які генерує навантаження.

Реалізацію цифрового режекторного фільтра виконано на платформі ESP32-S3, що містить двоядерний мікроконтролер Xtensa® 32-bit LX7, здатний працювати на частоті 240 МГц, та має 512 КБ внутрішньої пам’яті SRAM. Завдяки інтегрованому Wi-Fi 2,4 ГГц модулю відкривається можливість віддаленого контролю та діагностики параметрів роботи активного фільтра і оновлення програми його роботи за допомогою механізму OTA update (Over the Air).

Як джерело живлення використано гібридний однофазний сонячний інвертор Solis 4 кВт (S6-GR1P4K), що навантажений на частотнорегульовану насосну станцію Pedrollo потужністю 2,2 кВт.

Технічна реалізація активної фільтрації вищих гармонік струму показала аналогічні результати (рис. 6), як і у разі моделювання в програмі MATLAB, що наведено на рис. 5.

Висновки.

1. Використано цифровий режекторний фільтр для фільтрації опорного компенсаційного сигналу активних фільтрокомпенсуючих пристроїв.

2. Отриманий активний фільтр вищих гармонік струму завдяки використанню запропонованого методу цифрової фільтрації опорного сигналу для генерування компенсаційного струму дає змогу знизити THD струму споживання з 38,5 % до 4,3 %.

3. Цифровий режекторний фільтр, параметри якого можна налаштовувати локально або віддалено залежно від гармонійного складу несинусоїдального струму нелінійного навантаження, має переваги у порівнянні з аналоговими фільтрами сигналів.

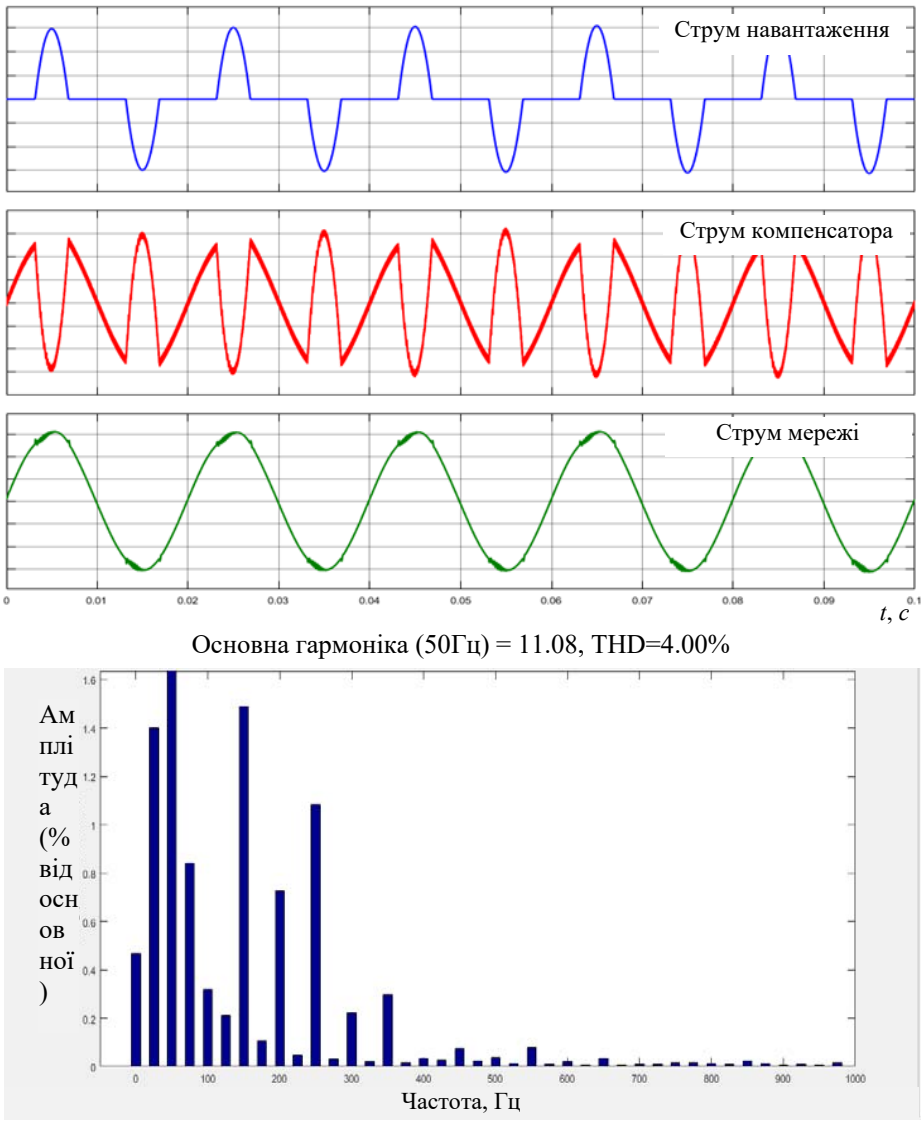

Рис. 5

4. Результати експериментальної перевірки запропонованого методу показали, що за допомогою активної корекції форми струму можна ефективно придушити вищі гармоніки несинусоїдальних струмів, а також компенсувати реактивну складову першої гармоніки струму.

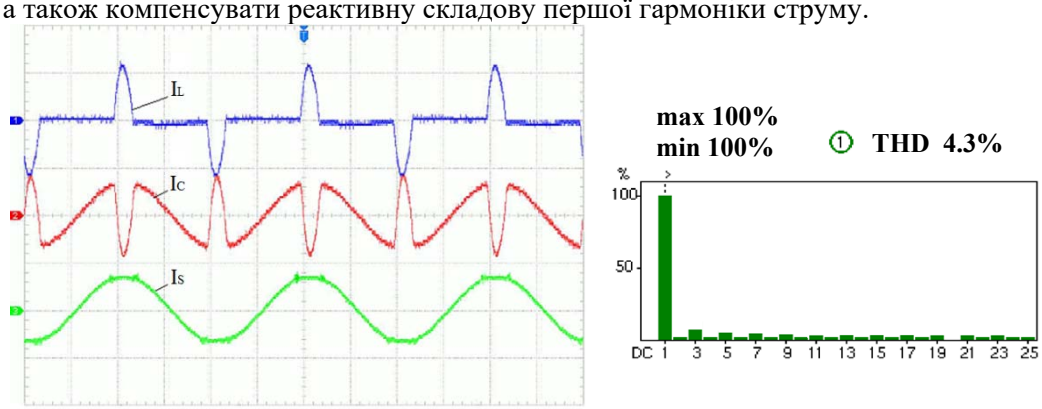

Рис. 6

5. Цифрова фільтрація є потужним інструментом обробки сигналів, який слід застосовувати у паралельних активних фільтрах задля генерації опорного компенсаційного сигналу, оскільки він має високу швидкодію та простоту застосування, що підвищує ефективність ФКП.

Фінансується за держбюджетною темою «Аналіз, синтез та розвиток принципів побудови гібридних фільтрів гармонік струму як універсальних засобів покращення електромагнітної сумісності пристроїв перетворювальної техніки з мережею живлення» (шифр «Гібрид»), КПКВК 6541030, що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ від 29.06.2021 р., протокол № 8. Державний реєстраційний номер теми 0122U001711

1. Жаркін А.Ф., Палачов С.О., Шкляр Т.Б. Аналіз ефективності застосування пасивних фільтрових коригувальних пристроїв в низьковольтних електричних мережах України. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2014. № 9 (128). С. 153-160.
2. Rashid M.H. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications. Butterworth-Heinemann Publishers, 2011. Pp. 1193-1228.
3. Стаценко О.В. Аналіз роботи паралельного активного коректора струму з релейним керуванням. *Вісник КНУТД*. 2015. №5 (90). С. 113-117.
4. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE trans. on industrial electronics*. 1999. Vol. 46. No 5. Pp. 960-971. DOI: https://doi.org/10.1109/41.793345.
5. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*. 2005. Vol. 93. No 12. Pp. 2128-2141. DOI: https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603.
6. Pinto J.G., Neves P., Pregitzer R., Monteiro F.C., Afonso L. Single Phase Shunt Active Filter with Digital Control. International Conference on *Renewable Energies and Power Quality* (ICREPQ'07), Seville, Spain, 28-30 March 2007. Vol. 5. No 1. DOI: https://doi.org/10.24084/repqj05.349.
7. Xiao C., Pei X., Y Liu., Lu Y., Wang C., Xu F. Adaptive harmonic current compensation method with SAPF based on SOGI. IEEE *International Power Electronics and Application* Conference and Exposition *(PEAC)*, Shenzhen, China, 04-07 November 2018. Pp. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590342.
8. Zumbahlen H. Linear Circuit Design Handbook by Analog Inc. Analog Devices Inc., 2007. Pp. 8.1-8.52.

APPLICATION OF THE DIGITAL FILTERING METHOD FOR CORRECTING THE CURRENT WAVEFORM IN NETWORKS WITH ALTERNATIVE POWER SOURCES

P.P. Podeiko, V.M. Gubarevich, V.G. Grebenyuk
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: ppodeiko@ied.org.ua.

It is proposed to use a digital notch filter to form a reference compensation signal for a parallel single-phase active current harmonic filter, which is simple and flexible compared to known methods in its technical implementation. Mathematical modelling of the digital filter was performed in Matlab, and the results of the practical implementation of the filter-compensating device are presented, confirming the main theoretical results of the study. References 8, fig. 6.
Key words: alternative power supplies, nonlinear load, digital filter, current waveform corrector, reference signal, total harmonic distortion factor.

1. Zharkin A.F., Palachov S.O., Shkliar T.B. The analysis of the efficiency of the use of passive filter correction devices in the low-voltage electrical networks of Ukraine. *Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit*. 2014. No 9 (128). Pp. 153-160. (Rus)
2. Rashid M.H. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications. Butterworth-Heinemann Publishers, 2011. Pp. 1193-1228.
3. Statsenko O.V. Analysis of the operation of a parallel active current corrector with relay control. *Visnyk KNUTD*. 2015. No 5(90). Pp. 113-117. (Ukr)
4. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE trans. on industrial electronics*. 1999. Vol. 46. No 5. Pp. 960-971. DOI: https://doi.org/10.1109/41.793345.
5. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*. 2005. Vol. 93. No 12. Pp. 2128-2141. DOI: https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603.
6. Pinto J.G., Neves P., Pregitzer R., Monteiro F.C., Afonso L. Single Phase Shunt Active Filter with Digital Control. International Conference on *Renewable Energies and Power Quality* (ICREPQ'07), Seville, Spain, 28-30 March 2007. Vol. 5. No 1. DOI: https://doi.org/10.24084/repqj05.349.
7. Xiao C., Pei X., Y Liu., Lu Y., Wang C., Xu F. Adaptive harmonic current compensation method with SAPF based on SOGI. 2018 IEEE *International Power Electronics and Application* Conference and Exposition *(PEAC)*, Shenzhen, China, 04-07 November 2018. Pp. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/PEAC.2018.8590342.
8. Zumbahlen H. Linear Circuit Design Handbook by Analog Inc. Analog Devices Inc., 2007. Pp. 8.1-8.52.

Надійшла 29.11.2024
Прийнята 10.11.2025