

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПІДСИЛЮВАЧА СИГНАЛУ  
З МІНІМАЛЬНИМИ НЕЛІНІЙНИМИ СПОТВОРЕННЯМИ**

**Ю.Ф. Тесик**<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, **О.Л. Карасінський**<sup>1\*\*</sup>, канд. техн. наук, **Р.М. Мороз**<sup>1\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, **С.Ю. Пронзалева**<sup>2\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, **М.В. Зайков**<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, **О.М. Богдан**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: [luckyposhta@gmail.com](mailto:luckyposhta@gmail.com).

<sup>2</sup>НВО ТОВ «ЕЛВІН, ЛТД»,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

*Представлено метод цифро-аналогового підсилення синусоїдальних сигналів, який дає змогу зменшити коефіцієнт нелінійних спотворень калібрувального сигналу до 0,003 % в розширеному робочому діапазоні. Приведено структурну схему аналого-цифрового підсилювача вхідного сигналу у вихідний, яка забезпечує мінімальні нелінійні спотворення вихідного сигналу. Описано принцип дії підсилювача. Наведено діаграми залежності коефіцієнтів передачі вхідного масштабуючого підсилювача та вихідного високовольтного цифро-аналогового перетворювача від амплітуди вхідного сигналу, та результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик дослідного зразка підсилювача. Бібл. 10, рис. 2.*

**Ключові слова:** калібрування, підсилення, коефіцієнт нелінійних спотворень, діапазон, автоматизація.

Проблема забезпечення електроенергетики засобами вимірювання параметрів якості електроенергії (ПЯЕ) існує вже понад 50 років. За цей час змінилось п'ять стандартів, починаючи з радянського ГОСТ 13109-67 і закінчуючи сучасними стандартами [1, 2] з підвищенням вимог до точності вимірювання і відтворення ПЯЕ. Загальне зростання вимог становить 10 разів. Прийнятий в Україні стандарт ДСТУ ІЕС 61000-4-7:2012 вимагає забезпечити вимірювання ПЯЕ з похибкою не нижче 0,1 %. На жаль, в Україні відсутні первинний еталон (ПЯЕ) і автоматизовані засоби їх відтворення, які б давали можливість атестувувати прилади контролю якості електричної енергії (ЕЕ) з такою точністю.

Єдина у світі міра ПЯЕ, створена зусиллями ІЕД НАН України, забезпечує серійний випуск робочих засобів вимірювання з точністю 0,1 %, але вона забезпечує відтворення необхідних метрологічних характеристик тільки у ручному режимі, що вимагає великих витрат часу у процесі атестації робочих засобів контролю ПЯЕ. В той же час кількість таких засобів, які завозяться в Україну і потребують первинної і періодичної перевірки, неухильно зростає і становить на цей час близько 100000 одиниць. Відсутність еталону ПЯЕ гальмує вітчизняне серійне виробництво засобів контролю якості електроенергії.

У світовій практиці найкращі метрологічні характеристики щодо відтворення ПЯЕ має калібратор Fluke 6105A [3] фірми Fluke (США), який забезпечує серійний випуск робочих засобів вимірювання з точністю 0,15 %, що не відповідає вимогам стандарту. Крім того він також не автоматизований і коштує 4 млн. гривень. Головна метрологічна установа України ДП «Урметрестандарт» має у своєму розпорядженні калібратор ПЯЕ російського виробництва типу Ресурс - К2 [4], який дає змогу атестувувати засоби вимірювання ПЯЕ класів точності 0,5 і 1,0, що тим більше не відповідає вимогам стандарту.

Не менш важливими є характеристики калібраторів для перевірки засобів обліку ЕЕ, вимоги щодо параметрів калібрувальних сигналів яких також весь час зростають [5–7]. Перелік вимог до характеристик тестових сигналів метрологічного устаткування досить широкий. Розглянемо більш детально в цій роботі метод боротьби з несинусоїдальністю вихідних сигналів метрологічного устаткування.

Стандартом [1] встановлено похибку вимірювання коефіцієнту несинусоїдальності на рівні 0,05 %. Якщо нелінійні спотворення самого калібрувального сигналу становлять також 0,05 %, то в результаті атестації вимірювача нелінійних спотворень за допомогою такого сигналу будемо мати похибку атестації 100 %. Значення КНС вихідних сигналів для Fluke становить 0,003% лише за максима-

© Тесик Ю.Ф., Карасінський О.Л., Мороз Р.М., Пронзалева С.Ю., Зайков М.В., Богдан О.М., 2024

ORCID: \* <https://orcid.org/0000-0001-6567-1436>; \*\* <https://orcid.org/0000-0002-5323-8106>;

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-4292-8160>; \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-2205-6035>;

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-0637-2492>; \*\*\*\*\* <https://orcid.org/0009-0002-9939-1170>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

льного вихідного сигналу калібратора. Зменшення рівня вихідного сигналу калібратора призводить до зростання КНС до 0,03%, що також не дозволяє проводити метрологічну атестацію засобів вимірювання рівня нелінійних спотворень сигналів мережі, оскільки не відповідає вимогам стандарту.

**Метою роботи** є розробка методу цифро-аналогового підсилення синусоїдальних сигналів з мінімальним коефіцієнтом нелінійних спотворень у розширеному діапазоні вихідних сигналів та створення на його основі калібратора параметрів електроенергії з коефіцієнтом нелінійних спотворень на рівні 0,003%.

Стандартами [1, 2, 5–7] на електролічильники, прилади контролю якості електроенергії, щитові прилади та інші нормуються певні вимоги до метрологічного обладнання, за яких допускається проведення атестації. Перелік вимог до тестових сигналів метрологічного устаткування досить великий. Розглянемо вплив несинусоїдальності на метрологічні характеристики засобів вимірювання і методи покращення коефіцієнта нелінійних спотворень КНС.

Високого рівня синусоїдальності можливо досягти, використовуючи аналогові калібрувальні сигнали. Але апаратура, заснована на використанні аналогових кіл, має низьку швидкодію. Крім того, управління аналоговими колами для відтворення багатоканальних аналогових сигналів значно ускладнене. З метою підвищення швидкодії і ступеню автоматизації метрологічних стендів фірми світового рівня використовують сигнали, представлені у цифровій формі і з цифровою обробкою.

У сучасних засобах вимірювання і відтворення каліброваних сигналів застосовуються цифрові методи обробки і управління. Перехід від аналогових сигналів до цифрових відбувається шляхом їх квантування за рівнем і дискретизації у часі. Функцію квантування виконує аналого-цифровий перетворювач (АЦП), недоліком якого є погіршення форми досліджуваних і відтворюваних сигналів. Особливо це проявляється в тих випадках, коли для перетворення аналогового сигналу використовується не весь динамічний діапазон розрядів АЦП, а лише його невелика частина.

Використовуючи 16-розрядний АЦП і відповідний рівень дискретизації аналогового сигналу у часі, досяжним є отримання коефіцієнту несинусоїдальності на рівні 0,003%. Але цей рівень дійсний лише за умов використання всього діапазону розрядності АЦП. Із зниженням амплітуди сигналу кількість розрядів АЦП, необхідних для перетворення вибірок аналогового сигналу в код буде зменшуватися, в результаті чого буде зростати рівень нелінійних спотворень відтворюваного сигналу у високовольтному цифро-аналоговому перетворювачі (ВЦАП). Коефіцієнт зростання КНС вихідного сигналу обчислюється за формулою

$$K = N_{\max} / N_t, \quad (1)$$

де  $N_{\max}$  – максимальна кількість розрядів АЦП;  $N_t$  – плинна кількість розрядів АЦП.

Таким чином зі зменшенням амплітуди сигналу у 10 разів THD зросте до 0,03%, що не відповідає вимогам стандарту [1].

Відомий метод адаптації засобів вимірювання електроенергії до амплітуди вимірюваного сигналу [8, 9] з метою зменшення впливу квантування на нелінійні ушкодження сигналу і, відповідно, похибку вимірювання. Запозичення цього методу дало змогу авторам вирішити зворотну задачу, а саме, зменшити нелінійні спотворення відтворюваного сигналу калібратора [10], який використовується для калібрування засобів вимірювання коефіцієнтів нелінійних спотворень.

Авторами створено новий метод цифро-аналогового підсилення синусоїдальних сигналів, який полягає у введенні до його алгоритму функціонування двох синхронних перетворень: підсилення і послаблення сигналу на одну і ту саму величину, що дає змогу таким чином суттєво зменшити рівень нелінійних ушкоджень підсилених сигналів в усьому динамічному діапазоні. Цей метод використано в підсилювачі, який розглядається нижче.

На рис. 1 показано структурну схему цифро-аналогового підсилювача. Вона складається з мас-штабуючого підсилювача (МП), аналого-цифрового перетворювача (АЦП), мікроконтролера (МК), високовольтного цифро-аналогового перетворювача (ВЦАП) і цифрового компаратора (ЦК).

Задля малого вхідного сигналу кількість розрядів АЦП, необхідних для перетворення аналогових вибірок у код зменшується. Це призводить до зростання КНС калібрувального сигналу. Для уникнення цього явища авторами запропоновано синхронно із зменшенням амплітуди вхідного сигналу збільшувати

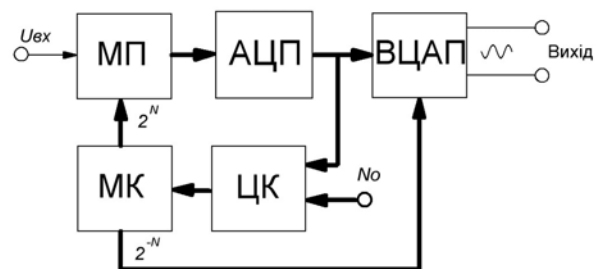


Рис. 1

коефіцієнт передачі МП до того моменту доки кількість розрядів АЦП, необхідних для цифрового перетворення сигналу, не досягне максимального значення. Звичайно, що введення такої функції призводить до невідповідності амплітуди вихідного сигналу до його реального значення. Тому після АЦП встановлюють регульований ВЦАП, коефіцієнт передачі якого зворотно-пропорційний до коефіцієнту передачі ЦАП.

Синусоїдальний сигнал подається на вхід МП, де його амплітуда зростає до значення, яке відповідає максимальній розрядності АЦП. Вихідний сигнал АЦП у вигляді паралельного коду надходить на цифрові входи ВЦАП, де перетворюється в синусоїдальний високовольтний аналоговий сигнал. За умови зростання амплітуди сигналу на виході МП до рівня, код АЦП якого відповідає  $N_0$ , спрацьовує цифровий компаратор ЦК і формує вихідний сигнал на порт МК, припиняючи зростання вихідного сигналу МП.

Слід зазначити, що до точності коефіцієнта передачі МП не висувається особливих вимог. Головним є забезпечення синхронної зміни коефіцієнтів передачі МП і ЦАП, що забезпечується МК, і їхню стабільність. До складу МП входять операційний підсилювач, електронні ключі, які управляються вихідним кодом МК, і резистори, які комутуються ключами таким чином, щоб забезпечити відповідний коефіцієнт передачі МП. Масштабуючий підсилювач складається з наступних компонентів: резистивної матриці типу PGA 206, яка включає ключі і резистори, операційного підсилювача типу TL 071 і мікроконтролера, функції якого забезпечує мікросхема STM 32F 407.

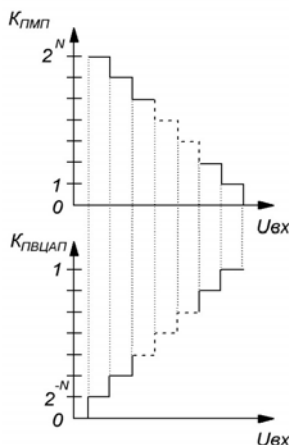


Рис. 2

На рис. 2 показано діаграми залежностей коефіцієнтів передачі МП і ВЦАП від рівня вхідного сигналу, з яких видно, що за умови мінімального сигналу коефіцієнт передачі  $K_{МП}$  має максимальне значення  $2^N$  з метою використання максимальної кількості розрядів АЦП, в той час як  $K_{IVЦАП}$  має мінімальне значення  $2^{-N}$ , завдяки чому компенсується невідповідність вихідного коду АЦП амплітуді вхідного сигналу.

Якщо змінний коефіцієнт передачі МП дорівнює  $K_1=2^N$ , то змінний коефіцієнт притлумлення ВЦАП має дорівнювати  $K_2=2^{-N}$ . Функцію управління значеннями коефіцієнта підсилення МП і коефіцієнта притлумлення ВЦАП виконує МК. В результаті всіх перетворень вихідний сигнал підсилювача матиме мінімальний коефіцієнт нелінійних спотворень і коефіцієнт передачі, який обчислюється за формулою

$$K = K_1 K_2 = 2^N \cdot 2^{-N} = 1. \quad (2)$$

Із зменшенням вихідного коду АЦП по відношенню до опорного коду сигналу  $N_0$ , за командою ЦК, знову починається зростання коду на виході МК і цифровому вході АЦП.

За результатами досліджень створено дослідний зразок цифро-аналогового підсилювача, метрологічні характеристики якого наступні: діапазон вихідних напруг – 1 мВ–300 В, діапазон робочих частот – 45 Гц–5000 Гц, основна похибка відтворення фазних напруг – 0,005 %, коефіцієнт несинусоїдальності – 0,003 %, час встановлення робочої точки перевірки – 0,5 с.

Таким чином, застосування адаптивного методу до формування калібрувальних сигналів дає можливість вирішити низку проблемних питань: зменшити похибку відтворення фазних напруг, КНС вихідного сигналу, розширити робочий діапазон вихідного сигналу високовольтного цифро-аналогового підсилювача. При цьому зростає ступінь автоматизації метрологічного устаткування, підвищується технологічність процесу атестації засобів вимірювання.

**Висновки.** Результати метрологічних випробувань цифро-аналогового підсилювача, виготовленого на основі запропонованого методу, свідчать про світовий рівень отриманих результатів щодо точності відтворення фазних напруг та нелінійних спотворень вихідних сигналів калібраторів параметрів електроенергії і вказують на перспективність обраного напрямку досліджень.

Серійне впровадження результатів досліджень дозволить не тільки уникнути закупівель за кордоном надзвичайно дорогих високоточних засобів вимірювальної техніки, але і забезпечити незалежність України в галузі метрологічного забезпечення електроенергетики та сприятиме розширенню експортної номенклатури засобів вимірювання.

1. ДСТУ ІЕС 61000-4-7:2012 Електромагнітна сумісність. Частина 4-7. Методики випробування та вимірювання. Загальна настанова щодо вимірювання гармонік та інтергармонік від електропостачальних систем загальної призначеності й допоміжного устаткування (ІЕС 61000-4-7:2009, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=29280](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29280) (дата звернення 12.03.2024)

2. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. (EN 50160:2010, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=51529](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=51529) (дата звернення 12.03.2024)
3. Technical Data 6105A Electrical Power Quality Calibrator. URL: [https://eu.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a-6100b-electrical-power-quality-calibrat?quicktabs\\_product\\_details=0](https://eu.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a-6100b-electrical-power-quality-calibrat?quicktabs_product_details=0) (дата звернення 12.03.2024)
4. Калибратор анализаторов качества электроэнергии Ресурс К2. URL: [http://www.svpribor.com.ua/modules/InternetShop/management/storage/files/products/instruction/338/Resurs\\_K2.pdf](http://www.svpribor.com.ua/modules/InternetShop/management/storage/files/products/instruction/338/Resurs_K2.pdf) (дата звернення 12.03.2024)
5. ДСТУ IEC 61036:2001 Лічильники статичної активної електроенергії змінного струму (Класи точності 1 та 2). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=25475](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25475) (дата звернення 12.03.2024)
6. ДСТУ IEC 62052-11:2012 Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму. Загальні вимоги, випробування та умови випробування. Частина 11. Лічильники електричної енергії (IEC 62052-11:2003, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=53200](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=53200) (дата звернення 12.03.2024)
7. ДСТУ EN 62586-2:2018 Вимірювання якості електроенергії в системах електроживлення. Частина 2. Функційні випробування та вимоги щодо невизначеності (EN 62586-2:2017, IDT; IEC 62586-2:2017, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=78046](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78046) (дата звернення 12.03.2024)
8. Тесик Ю.Ф., Пронзелева С.Ю. Вплив метрологічного забезпечення на ефективність використання електроенергії. *Гідротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки*. 2015. Вип. 10. С. 229-233.
9. Тесик Ю.Ф. Створення адаптивних засобів обліку та аналізу якості електроенергії. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. 05.11.05. Інститут електродинаміки НАН України. Київ. 2010. 32 с.
10. Таранов С.Г., Тесик Ю.Ф., Карасинский О.Л., Мороз Р.Н. Развитие принципов построения высоковольтных цифро-аналоговых преобразователей. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 64–66.

#### THE DIGITAL-ANALOGUE SIGNAL AMPLIFIER WITH MINIMUM NONLINEAR DISTORTIONS RESEARCH

Yu.F. Tesik<sup>1</sup>, O.L. Karasinskiy<sup>1</sup>, R.M. Moroz<sup>1</sup>, S.Yu. Pronzeleva<sup>2</sup>, M.V. Zaikov<sup>1</sup>, O.M. Bogdan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: [luckyposhta@gmail.com](mailto:luckyposhta@gmail.com).

<sup>2</sup> NGO LLC «ELVIN, Ltd», Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

*A method of expanding the operating range of the amplifier is presented, which allows reducing the coefficient of nonlinear distortions of the calibration signal to 0.003%. The structural diagram of the analog-digital amplifier of the input signal to the output, which provides minimal nonlinear distortion of the output signal, is given. The principle of operation of the amplifier is described. The input scaling amplifier and output highvoltage digital-to-analog converter transmission coefficients depend on the input signal amplitude. The results of experimental studies of the metrological characteristics of the experimental sample of the amplifier are given. References 10, figures 2.*

**Key words:** calibration, amplification, coefficient of nonlinear distortions, range, automation.

1. State Standard of Ukraine IEC 61000-4-7:2012 Electromagnetic compatibility. Part 4-7. Test and measurement methods. General instruction on the measurement of harmonics and interharmonics from power supply systems of general purpose and auxiliary equipment. (IEC 61000-4-7:2009, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=29280](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29280) (Accessed 12.03.2024) (Ukr.)
2. State Standard of Ukraine EN 50160:2014 Characteristics of power supply voltage in electrical networks of general purpose. (EN 50160:2010, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=51529](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=51529) (Accessed 12.03.2024) (Ukr.)
3. Technical Data 6105A Electrical Power Quality Calibrator. URL: [https://eu.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a-6100b-electrical-power-quality-calibrat?quicktabs\\_product\\_details=](https://eu.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a-6100b-electrical-power-quality-calibrat?quicktabs_product_details=) (Accessed 12.03.2024)
4. Calibrator of power quality analyzers Ресурс К2. URL: [http://www.svpribor.com.ua/modules/InternetShop/management/storage/files/products/instruction/338/Resurs\\_K2.pdf](http://www.svpribor.com.ua/modules/InternetShop/management/storage/files/products/instruction/338/Resurs_K2.pdf) (Accessed 12.03.2024) (Rus.)
5. State Standard of Ukraine IEC 61036:2001 Counters of static active alternating current electricity (Accuracy classes 1 and 2). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=25475](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25475) (Accessed 12.03.2024) (Ukr.)
6. State Standard of Ukraine IEC 62052-11:2012 Means of measuring alternating current electrical energy. General requirements, tests and test conditions. Part 11. Electric energy meters (IEC 62052-11:2003, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=53200](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=53200) (Accessed 12.03.2024) (Ukr.)
7. State Standard of Ukraine EN 62586-2:2018 Measurement of the quality of electricity in power supply systems. Part 2. Functional tests and uncertainty requirements (EN 62586-2:2017, IDT; IEC 62586-2:2017, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=78046](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78046) (Accessed 12.03.2024) (Ukr.)
8. Tesyk Yu.F., Pronzeleva S.Yu. The impact of metrological support on efficiency use of electricity. *Hydrotechnologies, navigation, traffic control and design of aviation and space technology*. 2015. Issue 10. Pp 229-233. (Ukr.)
9. Tesyk Yu.F. Creation of adaptive means of accounting and analysis of electricity quality: author's abstract of Dr. tech. sci. diss.: 05.11.05. Institute of Electrodynamics NAN of Ukraine. Kyiv. 2010. 32 p. (Ukr.)
10. Taranov S.G., Karasinskiy O.L., Tesik Yu.F., Moroz R.N. Use of new principle of switching reference voltages of high-voltage DAC. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2014. No 4. Pp. 64–66. (Rus.)

Надійшла 15.06.2024  
Остаточний варіант 10.09.2024