



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 131010

(13) C2

(51) МПК

G01R 23/16 (2006.01)

G01R 23/20 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: а 2025 00896

(22) Дата подання заявки: 27.02.2025

(24) Дата, з якої є чинними
права інтелектуальної
власності: 09.07.2026

(41) Публікація відомостей
про заявку: 13.08.2025, Бюл.№ 33

(46) Публікація відомостей
про державну
реєстрацію: 08.07.2026, Бюл.№ 27

(72) Винахідник(и):

Бабак Віталій Павлович (UA),
Ковтун Світлана Іванівна (UA),
Куц Юрій Васильович (UA),
Малько Володимир Петрович (UA)

(73) Володілець (володільці):

ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК
УКРАЇНИ,

вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150 (UA)

(74) Представник:

ПЕШКОВА ІРИНА БОРИСІВНА

(56) Перелік документів, взятих до уваги
експертизою:

US 4918381 A, 17.04.1990
US 2012/0081104 A1, 05.04.2012
SU 1629873 A1, 23.02.1991
CN 112485523 A, 12.03.2021
KR 20140013465 A, 05.02.2014
SU 1552116 A1, 23.03.1990
CN 110954748 A, 03.04.2020
CN 101639499 A, 03.02.2010
RU 2013147204 A, 27.04.2015
US 2002/0109510 A1, 15.08.2002

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ СУМАРНИХ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ

(57) Реферат:

Винахід належить до вимірювання сумарних гармонічних спотворень напруги електропостачання в системі розподілу електроенергії і призначений для вимірювання сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень. Спосіб вимірювання сумарних гармонічних спотворень полягає в тому, що здійснюють вимірювання струму або напруги, отриманої електричним ланцюгом змінного струму для створення набору результатів вимірювання, проводять фільтрацію з використанням дискретного перетворення Фур'є набору вимірювань і визначення величин вимірюваного струму або напруги на гармонічних частотах вимірюваного струму або напруги, де частота гармонік є цілим числом, кратним основній частоті. Після чого обчислюють сумарний коефіцієнт гармонічного спотворення відповідно до функції, яка включає визначені амплітуди гармонік і зберігають сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень у пам'яті. Визначення основної частоти здійснюється як реалізація циклічно повторюваних дій – отримання аналітичного сигналу шляхом застосування до набору вимірювань дискретного перетворення Гільберта, оцінювання його фазової характеристики, обчислення за фазовою характеристикою проміжної оцінки основної частоти та її запам'ятовування. Також здійснюють визначення параметрів передискретизації набору результатів вимірювань, створення набору передискретизованих даних, узгоджених з оцінкою основної частоти, визначення за отриманими проміжними значеннями основної частоти її ковзного середнього, після чого за основну частоту вибирають ковзне середнє, отримане за відсутності змін його значень. Окрім

UA 131010 C2

того, визначають узгоджені з основною частотою обсяг набору даних і частоту дискретизації, згідно з якими виконують фінальну передискретизацію результатів вимірювань струму чи напруги. Після чого застосовують до отриманого набору даних дискретне перетворення Фур'є і визначають на цій основі амплітуди гармонік, які використовують для обчислення уточненого сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень. Технічним результатом винаходу є підвищення точності визначення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень.

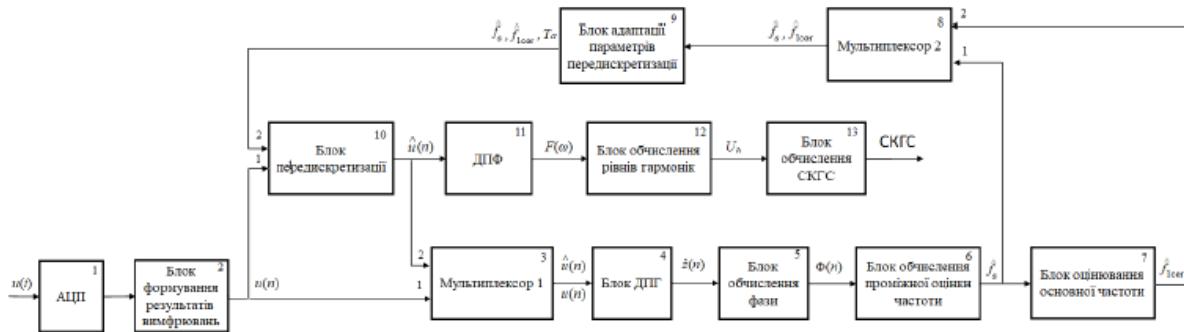


Fig. 1

Винахід належить до вимірювання сумарних гармонічних спотворень напруги електропостачання в системі розподілу електроенергії і призначений для вимірювання сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень (СКГС). Цей коефіцієнт належить до числа важливих показників якості електроенергії (ДСТУ EN 50160:2023 "Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності", Київ, ДП "Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості", 2023) у зв'язку з тим, що вміст вищих гармонік в системі розподілу електроенергії може бути причиною порушення експлуатаційних режимів роботи електричних пристроїв та електрообладнання. Це, в свою чергу, може призвести до значних негативних наслідків - коротких замикань, виходу з ладу електрообладнання, збільшення похибок вимірювального обладнання тощо. СКГС оцінюється шляхом визначення двох величин - повної енергії полігармонічного сигналу в широкій смузі частот та енергії його основної гармоніки, яка набагато перевищує енергію вищих гармонік. Оцінювання СКГС здебільшого виконують за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), яке застосовують до представленого часовим рядом аналізованого сигналу, отримують його спектр, визначають квадрати амплітуд всіх його складових та використовують їх для обчислення СКГС.

Відомий спосіб вимірювання сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень сигналу, що полягає у представленні сигналу множиною дискретних частотних смуг, апроксимації основної частоти сигналу і підсумовуванні відносних спектральних потужностей сигналу в діапазонах частот, що містять гармоніки апроксимованої основної частоти, за яким апроксимація основної частоти здійснюється шляхом реалізації наступних дій - визначенні діапазону частот, який містить максимальну спектральну потужність, визначенні частоти-кандидата у вибраному діапазоні частот, підсумовуванні відносних спектральних потужностей у діапазонах частот, які містять гармоніки частоти-кандидата і повторенні двох попередніх операцій, принаймні один раз, з різними частотами-кандидатами, після чого за основну частоту обирається та частота-кандидат, яка дає найбільшу суму (Патент США № 4918381, Automated method for determining total harmonic distortion, G01R 23/16, опубл. 17.04 1990).

Точність автоматизованого вимірювання спотворень гармонічного сигналу, яке ґрунтується на використанні швидкого перетворення Фур'є, за умови апіорно невідомої основної частоти сигналу, покращується шляхом уточнення оцінки цієї частоти. Відсутність критеріїв вибору меж частотних смуг обумовлює низьку точність визначення основної частоти сигналу, що не дає змоги реалізувати потенційні можливості його спектрального аналізу на основі швидкого перетворення Фур'є та оцінювання сумарних гармонічних спотворень.

Найбільш близьким за технічною суттю до способу, що заявляється, є спосіб вимірювання сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень в електричному ланцюзі змінного струму, який приймає струм або напругу з основною частотою. Спосіб полягає у вимірюванні струму або напруги, отриманої електричним ланцюгом змінного струму, створенні набору результатів вимірювань, фільтрації шляхом застосування дискретного перетворення Фур'є (набору вимірювань і визначенні величин вимірюваного струму або напруги гармонічних складових, де частота вищих гармонік є цілим числом, кратним основній частоті, а обчислення СКГС проводиться відповідно до функції, яка включає визначені амплітуди гармонік і збереження сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень у пам'яті (Патент США US 2012/0081104A1, Method for measurement of total harmonic distortion, G01R 23/16, опубл. 05.04. 2012).

Виділення частотних компонент сигналу відбувається шляхом застосування дискретного перетворення Фур'є або його реалізації у вигляді алгоритмів Герцеля, що дає змогу отримувати значення однієї частотної компоненти сигналу з меншою обчислювальною складністю. Ці алгоритми використано як вузькосмугові алгоритми фільтрації з частотною характеристикою, яка забезпечує смугу частот 1 Гц.

В патенті припускається, що частота основної гармоніки є відомою і становить 50 або 60 Гц. Використання такого способу має той недолік, що перетворення Фур'є (або Герцеля) виконується за тільки наближено відомої основної гармоніки. Для досягнення високої точності визначення значень частот в спектрі сигналу дискретного перетворення Фур'є необхідно забезпечити узгодження частоти основної гармоніки сигналу, частоти дискретизації та часу спостереження сигналу. Відсутність такого узгодження є причиною ефекту витоку спектру дискретного перетворення Фур'є (Lyons, Richard G.: Understanding Digital Signal Processing. Prentice Hall Professional Technical Reference Upper Saddle River, New Jersey, 2004, див. п. 3.8. DFT leakage, p.66), який призводить до значних похибок визначення числових значень основної та вищих гармонік, появи хибних вищих гармонік у спектрі сигналу і, як наслідок, до суттєвого зменшення точності визначення СКГС.

В основу винаходу поставлена задача вдосконалення способу вимірювання СКГС сигналів в системі розподілу електроенергії шляхом включення до його складу додаткових операцій, які дають змогу більш точно визначати значення основної частоти, і на цій основі підвищити точність вимірювання СКГС.

Поставлена задача вирішується тим, що спосіб вимірювання сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень в електричному ланцюзі змінного струму, який отримує струм або напругу з основною частотою, полягає в тому, що вимірюють струм або напругу, отримані електричним ланцюгом змінного струму для створення набору результатів вимірювань, фільтрують набір вимірювань з використанням дискретного перетворення Фур'є, визначають величини вимірюваного струму або напруги на гармонічних частотах вимірюваного струму або напруги, де частота вищих гармонік є цілим числом, кратним основній частоті, обчислюють сумарний коефіцієнт гармонічного спотворення відповідно до функції, яка включає визначення амплітуди гармонік і збереження сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень у пам'яті, у якому згідно з винаходом, визначення основної частоти здійснюється як реалізація циклічно повторюваних дій - отримання аналітичного сигналу шляхом застосування до набору вимірювань дискретного перетворення Гільберта, оцінювання його фазової характеристики, обчислення за фазовою характеристикою проміжної оцінки основної частоти та її запам'ятовування, визначення параметрів передискретизації набору результатів вимірювань, створення набору передискретизованих даних, узгоджених з оцінкою основної частоти, визначення за отриманими проміжними значеннями основної частоти її ковзного середнього, після чого за основну частоту вибирають ковзне середнє, отримане за відсутності змін його значень, визначають узгоджені з основною частотою обсяг набору даних і частоту дискретизації, згідно з якими виконують фінальну передискретизацію результатів вимірювань струму чи напруги, застосовують до отриманого набору даних дискретне перетворення Фур'є і визначають на цій основі амплітуди гармонік та сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень.

На фіг. 1 зображено структурну схему пристрою, що реалізує спосіб, і містить 1 - аналого-цифровий перетворювач (АЦП), 2 - блок формування результатів вимірювань, 3, 8 - мультиплексори, відповідно, 1 та 2, 4 - блок дискретного перетворення Гільберта (ДПГ), 5 - блок обчислення фази, 6 - блок обчислення проміжної частоти, 7 - блок оцінювання основної частоти, 9 - блок адаптації параметрів передискретизації, 10 - блок передискретизації, 11 - блок дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), 12 - блок обчислення рівнів гармонік та 13 - блок обчислення СКГС.

На фіг. 2 наведено: вихідний сигнал мережі (крива 1) та його гільберт-образ (крива 2).

На фіг. 3 зображено залежність проміжних значень основної частоти від номера ітерації при реалізації ітераційного процесу передискретизації результатів вимірювання.

На фіг. 4 зображено графік уточнених значень основної частоти, отриманий шляхом застосування до наведених на фіг. 3 даних оператора ковзного середнього.

На фіг. 5 зображено графік різниці уточнених значень основної частоти між сусідніми ітераціями, отриманих за даними фіг. 4.

На фіг. 6 зображено графік абсолютної похибки визначення частоти основної гармоніки запропонованим ітераційним методом.

На фіг. 7 зображений спектр вищих гармонік напруги, отриманий за допомогою ДПФ без адаптації параметрів передискретизації до основної частоти.

На фіг. 8 зображено спектр вищих гармонік напруги, отриманий після адаптації параметрів передискретизації за оціненим значенням основної частоти.

Спосіб реалізується на прикладі відомих функціональних пристроїв (див. фіг.1). Всі складові структурної схеми - аналогово-цифровий перетворювач 1, блок формування результатів вимірювань 2, мультиплексори 3,8, блок ДПГ 4, блок обчислення фази 5, блок обчислення проміжної оцінки частоти 6, блок оцінювання основної частоти 7, блок адаптації параметрів передискретизації 9, блок передискретизації 10, блок ДПФ 11, блок обчислення рівнів гармонік сигналу 12 та блок обчислення СКГС 13 можуть бути реалізовані на основі мікропроцесора 32F030F4P6, який має у своєму складі 12-бітний АЦП з максимальною частотою дискретизації 1 МГц. Для забезпечення роботи мікропроцесора необхідно зменшити вихідну напругу мережі до напруги живлення мікропроцесора тобто до 3.3 В, для чого можна використати широкосмуговий подільник напруги на вході мікропроцесора.

Напруга з мережі електропостачання представляється моделлю

$$u(t) = U_1 \cos(2\pi f_1 t - \varphi_1) + \sum_{h=2}^H U_h \cos(2\pi h f_1 t - \varphi_h), \quad t \in T_a, U_1 \gg U_h, (1)$$

де U_1 , f_1 , φ_1 - відповідно, амплітуда, частота та початкова фаза 1-ої гармоніки, а U_h , φ_h -

відповідно, амплітуда та початкова фаза h -тої гармоніки, $f_h = h f_1$, T_a - час аналізу сигналу ($T_a > 1/f_1$). Стандартна номінальна напруга електропостачання для мереж загальної призначеності становить $U_{1nom}=230$ В, номінальна частота - $f_{1nom}=50$ Гц, а область значущих верхніх гармонік при оцінюванні СКГС напруги мереж електропостачання загальної призначеності зазвичай обмежується значенням $H=40$, але в разі потреби може бути збільшена без зміни сутності заявленого способу.

Згідно з рекомендаціями ДСТУ EN 50160:2023 та моделі (1) значення СКГС визначається як

$$СКГС = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^H U_h^2}{U_1^2}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Згідно з цим же стандартом відношення $U_h/U_1 \leq 0,06$, $h = \overline{2,40}$. За такої умови вираз (1) можна представити більш загальною моделлю вузькосмугового сигналу

$$u(t) = U(t) \cos \Phi(t), \quad t \in T_a, \quad (3)$$

де $U(t)$, $\Phi(t)$ – відповідно, обвідна і фазова характеристики (фаза) сигналу.

Процес визначення СКГС реалізується у два етапи. На першому етапі оцінюється поточне значення частоти першої гармоніки сигналу $u(t)$ (3) шляхом реалізації ітераційного методу уточнення частоти основної гармоніки та виконується адаптація параметрів збору даних до отриманої оцінки основної частоти. З цією метою в блоках структурної схеми пристрою здійснюються такі операції:

- аналого-цифрове перетворення сигналу в АЦП 1 (фіг. 1) з частотою дискретизації $f_s > 2Hf_1$, кратною номінальній частоті першої гармоніки, і отримання набору результатів вимірювання напруги у вигляді дискретного сигналу, як послідовності вкладених у сигнал (3) відліків

$$u(n) = U(n) \cos \Phi(n), \quad n = \overline{1, N}, \quad N = T_a f_s, \quad (4)$$

- застосування ітераційного методу уточнення частоти, що базується на загальній ідеї повторної дискретизації вибірки (4) за адаптованими до основної частоти параметрами передискретизації.

За початкові дані для реалізації ітераційного методу уточнення основної частоти беруть вибірку результатів вимірювання $u(n)$, $n = \overline{1, N}$, яку отримують в блоці 2. Ця вибірка через вхід 1 мультиплексора 1 (вхід 1) надходить на блок ДПГ 4, який формує дискретну версію комплексного аналітичного сигналу

$$\dot{Z}_{int_0}(n) = \dot{Z}(n) = u(n) + i\tilde{u}(n) = U(n) \cos \Phi(n), \quad n = \overline{1, N}, \quad (5)$$

де $i = \sqrt{-1}$ - уявна одиниця, $\tilde{u}(n)$ - дискретне перетворення Гільберта послідовності $u(n)$, $n = \overline{1, N}$.

На кожному j -му кроці передискретизації виконується послідовність дій:

1. Отримання дискретної версії комплексного аналітичного сигналу вигляду:

$$\dot{Z}_{int_j}(n) = u_{int_j}(n) + i\tilde{u}_{int_j}(n) = U_{int_j}(n) \cos \Phi_{int_j}(n), \quad n = \overline{1, N}, \quad j \in [1, J]; \quad (6)$$

де j , J – відповідно, поточний і максимальний номер кроку передискретизації.

2. Визначення в блоці обчислення фази 5 послідовності значень фази сигналу :

$$\Phi_{int_j}(n) = \arctg \frac{\tilde{u}_{int_j}(n)}{u_{int_j}(n)} + \frac{\pi}{2} \left\{ 2 - \text{sing}(\tilde{u}_{int_j}(n)) \cdot (1 + \text{sing}(u_{int_j}(n))) \right\} + \\ + L(\tilde{u}_{int_j}(n), u_{int_j}(n)), \quad n = \overline{1, N}, \quad j = \overline{0, J} \quad (7)$$

де $\text{sign}(\ast)$ - знакова функція, $L(\ast)$ - оператор розгортання фази за межі інтервалу $[0, 2\pi)$ (Куц Ю.В., Монченко О.В, Бистра І. М. та ін. Фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії виробів з конструкційних матеріалів: Монографія/ К.: Інтерсервіс, 2019. - 192 с.),

$$u_{int_0}(n) = u(n), \quad \tilde{u}_{int_j}(n) = \tilde{u}(n).$$

3. Визначення в блоці 6 проміжної оцінки частоти першої гармоніки сигналу на j -тому кроці ітерації за фазою (7):

$$f_{int_j} = \frac{f_s}{2\pi} \cdot \frac{\Phi_{int_j(j-1)}(n_2) - \Phi_{int_j(j-1)}(n_1)}{(n_2 - n_1)}, \quad n_1, n_2 \in (1, N), j \in [1, J], (8)$$

де n_1, n_2 - номери відліків фази з центральної частини послідовності (7), які характеризуються найменшими похибками.

4. Адаптація параметрів передискретизації в блоці 9, а саме узгодження з проміжною оцінкою частоти першої гармоніки $f_{int_j(j-1)}$ частоти дискретизації та часу аналізу T_a :

$$f_{sint_j} = \frac{N}{m} f_{f_{int_j(j-1)}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, j \in [1, J], (9)$$

$$T_{aint_j} = \frac{m}{f_{int_j(j-1)}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, j \in [1, J] . (10)$$

Значення $f_{int_j(j-1)}$ передається в блок 9 через мультиплексор 2 (вхід 1).

5. Передискретизація послідовності $u(n)$ (4) у блоці 10 для оновлення даних (9), (10) і отримання наступної проміжної послідовності $u_{int_j(n)}$; ця операція може бути виконана за допомогою "лінійного", "кубічного" або "сплайнового" методів.

6. Перехід до п. 1.

Підвищення точності визначення частоти першої гармоніки аналізованої напруги та покращення збіжності процесу уточнення цієї частоти реалізується шляхом застосування ковзного середнього до отриманої послідовності (8) проміжних оцінок частоти основної гармоніки напруги:

$$\hat{f}_{1cor_j} = \frac{f_{int_j(j-1)}}{4} + \frac{f_{int_j(j+1)}}{4} + \frac{f_{int_j(j)}}{2}, \quad j \in [1, J] . (11)$$

Ітераційний процес триває до тих пір, поки не буде досягнута необхідна точність визначення частоти Δf_{1cor} , тобто коли на k -му кроці буде виконана умова:

$$|\hat{f}_{1cor_k} - \hat{f}_{1cor_k(k-1)}| \leq \Delta f_{1cor} . (12)$$

Отримане значення частоти першої гармоніки характеризується підвищеною точністю і отримана за меншої кількості ітерацій, що буде нижче проілюстровано результатами модельного експерименту.

На другому етапі відбувається синхронізація параметрів збору даних - частоти дискретизації та часу аналізу, за визначеною частотою першої гармоніки (11) подібно до виразів (9) та (10):

$$f_{sint_k} = \frac{N}{m} \hat{f}_{1cor_k}, \quad (13)$$

$$T_{aint_k} = \frac{k}{\hat{f}_{1cor_k}}, \quad (14)$$

Значення $\hat{f}_{1cor_k}$ передається в блок 9 через мультиплексор 2 (вхід 2).

За отриманими параметрами (13) і (14) виконують в блоці (10) фінальну передискретизацію результатів вимірювань, до якої застосовують ДПФ в блоці (11) після чого визначають в блоці (13) амплітуди гармонічних складових U_h , $h \in [1, N]$ аналізованої напруги. За цими значеннями блоком 13 здійснюється обчислення СКГС згідно з виразом (2). Отримане в такий спосіб значення СКГС відрізняється підвищеною точністю, що буде нижче підтверджено результатами модельного експерименту.

Новим у запропонованому способі є те, що:

1) визначається з високою точністю реальна частота першої гармоніки сигналу на основі ітераційного аналізу його розгорнутої фази;

2) виконується адаптація сітки частот ДПФ до реальної частоти першої гармоніки сигналу, що дає змогу підвищити точність визначення амплітуд гармонічних складових досліджуваного сигналу без повторної дискретизації мережевої напруги (струму) і на цій основі підвищити точність та скоротити час визначення СКГС.

Для підтвердження досягнення поставленої мети проведено моделювання процесу визначення СКГС. В проведеному експерименті були обрані такі вихідні параметри моделі

досліджуваного сигналу: реальна частота першої гармоніки - 50,12 Гц; кількість вищих гармонік $N=12$, аналізований сигнал - це сума першої гармоніки з відносною амплітудою 1 та вищих гармонік порядку 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25 з відносними амплітудами: $U_3=0,05$, $U_5=U_7=0,03$, $U_9=U_{11}=0,015$, $U_{13}=0,01$ %, $U_{15}=U_{17}=U_{19}=U_{21}=U_{23}=U_{25}=0,005$ від U_1 .

5 На першому етапі модельного експерименту, за умови невідомої частоти першої гармоніки, її значення приймалось рівним номінальній частоті $f_{1nom}=50$ Гц, а параметри збору інформації задавались виходячи з цього значення: - частота дискретизації $f_s=50 \times 512=25,6$ кГц; обсяг вибірки $J=4096$ (що відповідає рівно 8 періодам сигналу); інтервал часу аналізу $T_a=0,16$ с.

10 На першому етапі моделювання визначалась оцінка частоти основної гармоніки. З цією метою застосовувався запропонований ітераційний метод визначення частоти, згідно з яким спочатку, за допомогою ДПГ, отримувался аналітичний сигнал (6), складові якого на першому кроці ітерації представлені на фіг. 2 (крива 1 - вихідна послідовність, крива 2 - її гільберт-образ), після чого визначалась фазова характеристика напруги (7), розраховувалась проміжна оцінка частоти основної гармоніки (8), виконувались адаптація параметрів передискретизації згідно з (9), (10) та власне передискретизація послідовності $u(n)$. гармоніки. Графік отриманих проміжних оцінок частоти першої гармоніки залежно від номера ітерації наведено на фіг. 3. Отримані значення частоти симетрично коливаються відносно заданої в експерименті частоти першої гармоніки - 50,12 Гц. Застосування до послідовності частот на фіг.3 ковзного середнього

(11) дає змогу забезпечити збіжність отриманих значень $\hat{f}_{1cor_j}$ до заданого в експерименті

20 значення 50,12 Гц. Графік функції $\hat{f}_{1cor_j}(j), j=\overline{1,47}$ наведено на фіг. 4. Уточнене значення основної частоти розраховане за 21 ітерацію, за якої виконується умова (12) $\Delta f_{1cor}=22$ мГц (фіг.

5), що становить $\hat{f}_{1cor_21} = 50,120021$; Гц, тобто визначене із абсолютною похибкою - 21 мГц. Графік абсолютних похибок визначення частоти основної гармоніки в залежності від номера ітерації наведено на фіг. 6.

25 Спектр досліджуваної напруги, отриманий без адаптації частоти дискретизації та часу аналізу до основної частоти напруги, наведений на фіг. 7. З цієї спектрограми видно, що значення вищих гармонік сигналу визначені зі значними похибками, а в спектрі сигналу з'явилися додаткові високочастотні складові, що погіршує точність визначення СКГС. Для подолання цього недоліку на другому етапі виконується адаптація параметрів збору даних до

30 отриманої оцінки частоти основної гармоніки напруги $\hat{f}_{1cor_21}$: частота дискретизації - $50,120021 \times 512=25661,450752$ Гц; обсяг вибірки $J=4096$; інтервал часу аналізу 0.159616 с. Спектр сигналу, отриманого після корегування параметрів збору даних до реальної частоти першої гармоніки, представлено на фіг. 8. З отриманої спектрограми видно, що амплітуди гармонік сигналу наблизились до заданих в модельному експерименті значень, а додаткові високочастотні складові зменшилися до нехтовно малих величин. Це доводить досягнення поставленої мети на якісному рівні.

Для кількісного оцінювання результату покращення точності обчислення СКГС були виконані його обчислення за формулою (2) для модельних даних та результатів розрахунків за складовими спектром, представлених на фіг. 7, фіг. 8. Отримані дані зведені в табл.1.

Табл. 1

Номер гармоніки	Дійсне значення напруги, В	Рівень гармоніки в спектрі сигналу до коригування, В (% від фактичного значення)	Рівень гармоніки в спектрі сигналу до коригування, В (% від фактичного значення)
3	11,5000	11,0900 (96,4348 %)	11,50007 (99,9994 %)
5	6,9000	6,6126 (95,8348 %)	6,90004 (99,9994 %)
7	6,9000	6,5533 (94,9754 %)	6,90003 (99,9996 %)
9	3,4500	3,1589 (91,5623 %)	3,45003 (99,9991 %)
11	3,4500	3,0986 (89,8145 %)	3,45003 (99,9991 %)
13	2,3000	1,9713 (85,7087 %)	2,30003 (99,9987 %)
15	1,1500	0,9282 (80,7130 %)	1,15003 (99,9974 %)
17	1,1500	0,9164 (79,687 %)	1,15002 (99,9983 %)
19	1,1500	0,8863 (77,0696 %)	1,15002 (99,9983 %)
21	1,1500	0,8449 (73,4696 %)	1,15002 (99,9983 %)

23	1,1500	0,7929 (68,9478 %)	1,15002 (99,9983 %)
25	1,150	0,7249 (63,0348 %)	1,15002 (99,9983 %)
СКГС	Дійсне значення, %	До коригування, %	Після коригування, %
	7,0710 %	6,7111 %	7,0711 %
Абсолютна похибка СКГС, $\delta_{СКГС}$	0	-0,3599 %	-0,0001 %

Абсолютна похибка СКГС визначалась за стандартною методикою:

- до коригування параметрів збору даних маємо:

$\delta_{СКГС} = 7,0710 - 6,7111 = 0,3599 \%$;

5 - після коригування параметрів збору даних отримуємо:

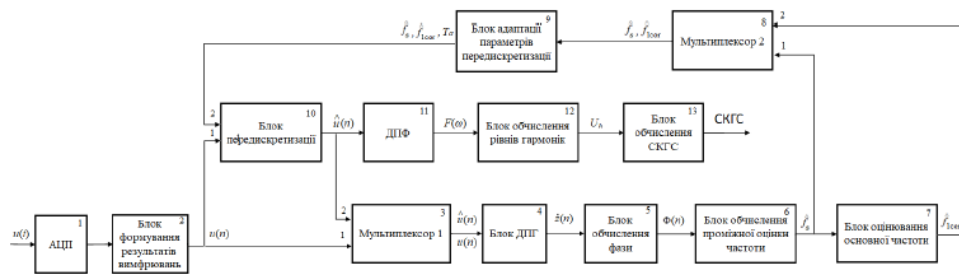
$\delta_{СКГС} = 7,0710 - 7,0711 = -0,0001 \%$;

Таким чином, в проведеному модельному експерименті абсолютні похибки визначення СКГС до та після виконання процесу коригування становили, відповідно, 0,3599 та 0,0001 %, що вказує на значне підвищення точності визначення СКГС в електричних ланцюгах змінного струму, який отримує струм або напругу з основною частотою і доводить досягнення поставленої мети.

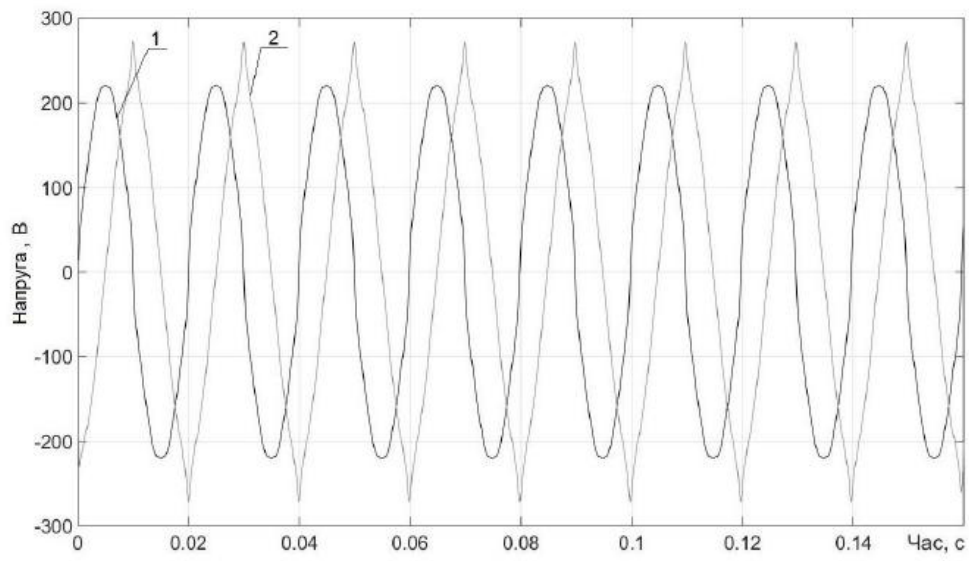
Даний спосіб дає можливість підвищити точність вимірювання сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень в системі розподілу електроенергії за рахунок визначення частоти першої гармоніки за допомогою ітераційного методу на основі дискретного перетворення Гільберта та адаптації до цього значення частоти дискретизації та часу аналізу вибірки досліджуваного сигналу струму чи напруги в електромережі.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

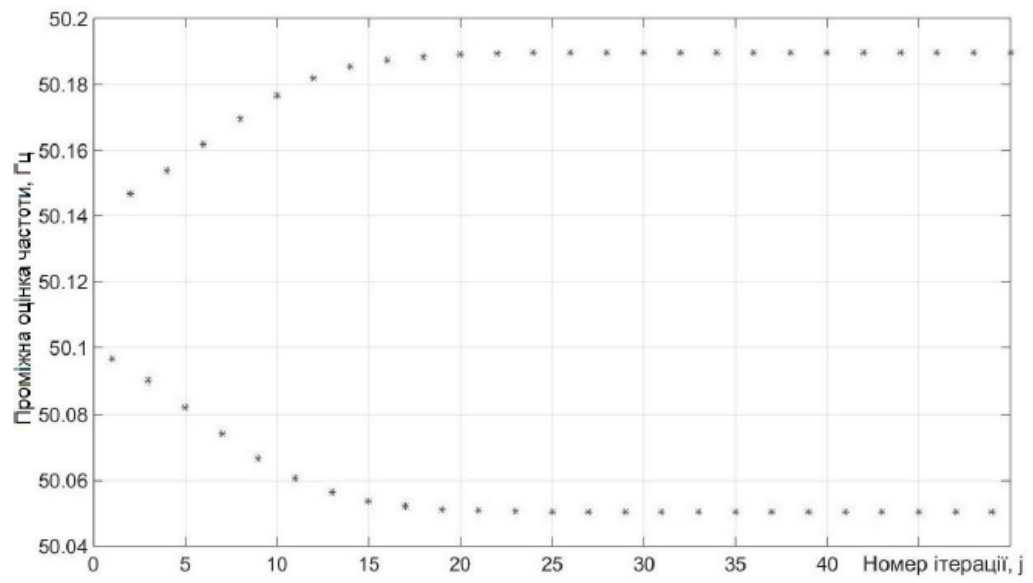
Спосіб вимірювання сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень в електричному ланцюзі змінного струму, який отримує струм або напругу з основною частотою, що полягає в тому, що здійснюють вимірювання струму або напруги, отриманої електричним ланцюгом змінного струму для створення набору результатів вимірювання, проводять фільтрацію з використанням дискретного перетворення Фур'є набору вимірювань і визначення величин вимірюваного струму або напруги на гармонічних частотах вимірюваного струму або напруги, де частота гармонік є цілим числом, кратним основній частоті, обчислення сумарного коефіцієнта гармонічного спотворення відповідно до функції, яка включає визначені амплітуди гармонік, і збереження сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень у пам'яті, який **відрізняється** тим, що визначення основної частоти здійснюють як реалізацію повторюваних дій - отримують аналітичний сигнал шляхом застосування до набору вимірювань дискретного перетворення Гільберта, оцінюють його фазову характеристику, обчислюють за фазовою характеристикою проміжної оцінки основну частоту та запам'ятовують її, визначають параметри передискретизації набору результатів вимірювань, створюють набір передискретизованих даних, узгоджених з оцінкою основної частоти, визначають за отриманими проміжними значеннями основної частоти її ковзне середнє, після чого за основну частоту вибирають ковзне середнє, отримане за відсутності змін його значень при наступному циклі передискретизації, визначають узгоджені з основною частотою обсяг набору даних і частоту дискретизації, згідно з якими виконують фінальну передискретизацію результатів вимірювань струму чи напруги, застосовують до отриманого набору даних дискретне перетворення Фур'є і визначають на цій основі амплітуди гармонік та сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень.



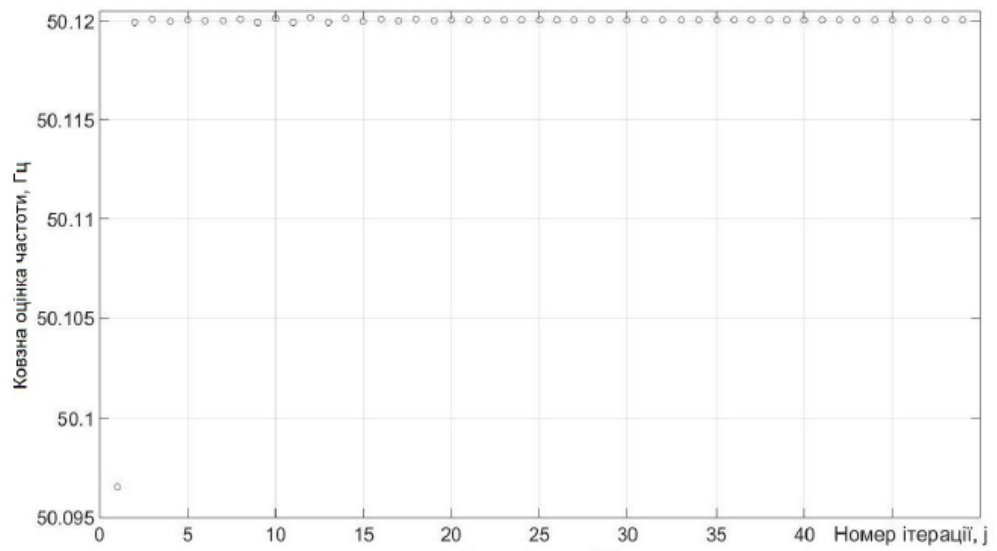
Фиг. 1



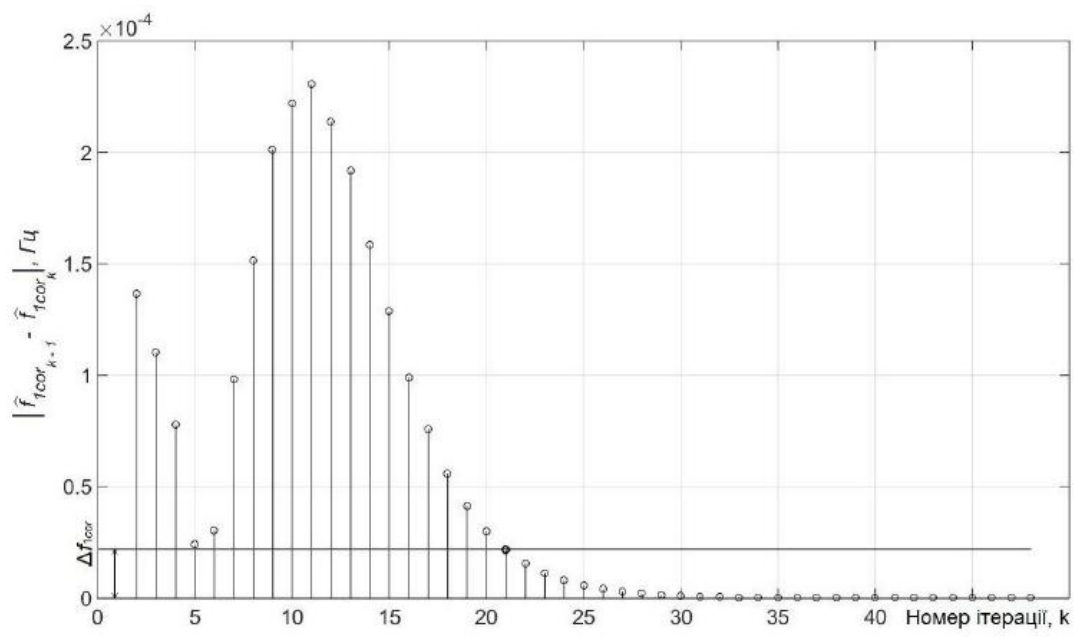
Фиг. 2



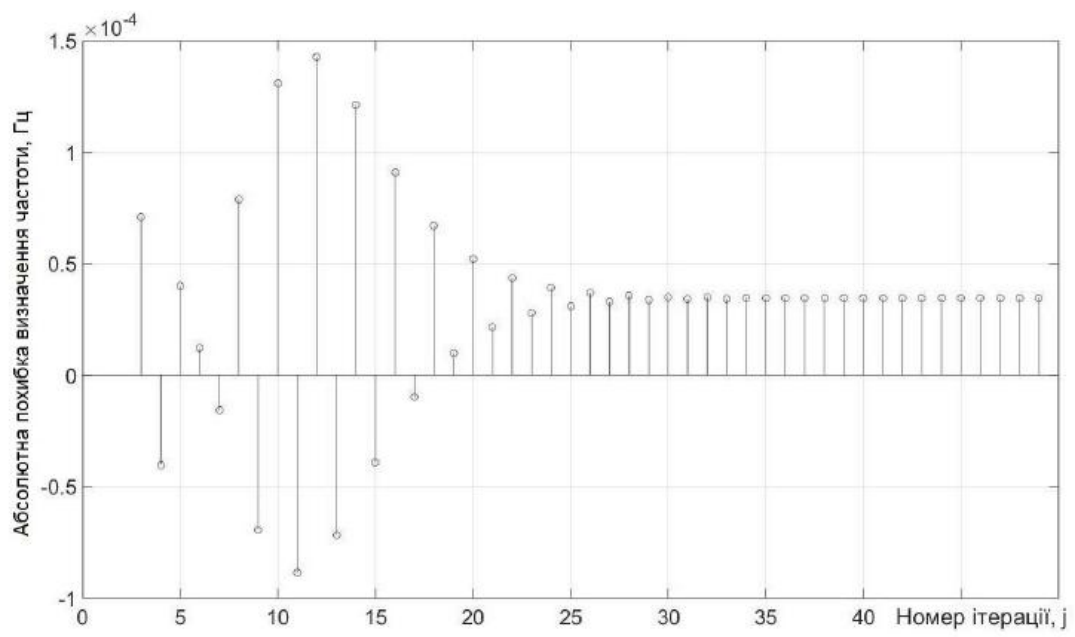
Фіг. 3



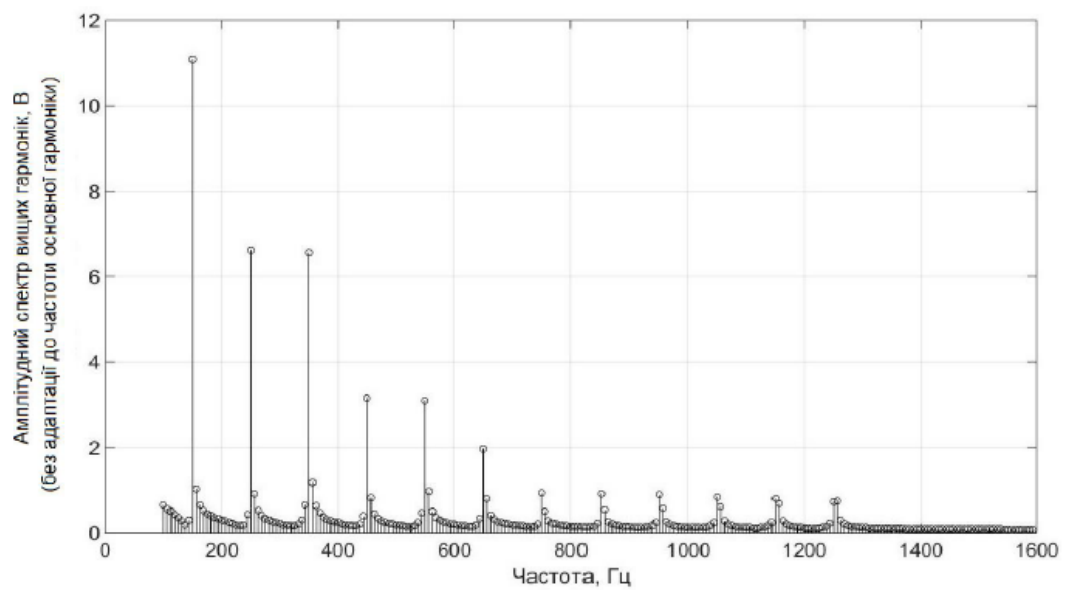
Фіг. 4



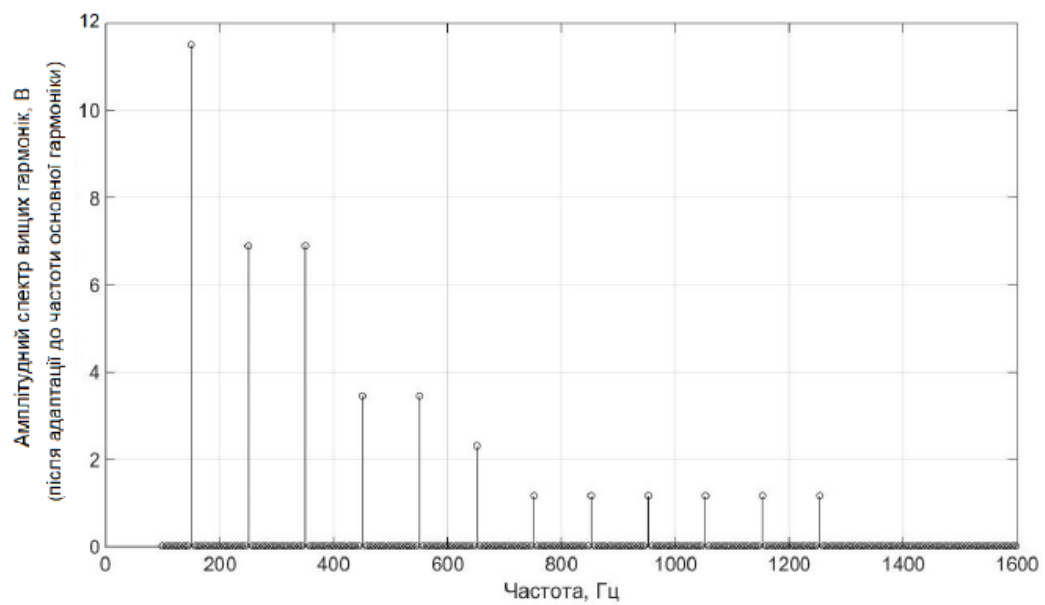
Фіг. 5



Фіг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8