

**КОРЕКЦІЯ ПОХИБОК У ПРИЛАДАХ ВИМІРЮВАННЯ
ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

О.Л. Карасинський*, канд. техн. наук, **Ю.Ф. Тесик****, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: pribor@ied.org.ua

Виконано дослідження методів корекції амплітудних та фазових похибок у приладах вимірювання параметрів електричної енергії з цифровою обробкою сигналів з частотою дискретизації кратною частоті мережі. Показана можливість корекції фазових похибок шляхом зсуву моменту запуску АЦП або шляхом повороту осей та перетворення координат векторів напруг і струмів. Проведено дослідження щодо використання цих методів на прикладі вимірювання активної та реактивної потужностей. Бібл. 11, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: корекція похибок, прилади, електричні мережі, аналого-цифрове перетворення, дискретизація, поворот координат вектора.

Вступ. Для вимірювання параметрів електричної енергії, зокрема показників якості електроенергії (ПЯЕ) [1], активної і реактивної потужностей [2] в лічильниках електроенергії (ЛЕЕ) все більше застосовуються засоби вимірювання, засновані на цифровій обробці оцифрованих миттєвих значень напруг та/або струмів. Типова схема вимірювальної частини таких приладів складається з вхідних аналогових пристроїв – дільників напруги (ДН), перетворювачів струм-напруга (ПСН), фільтрів нижніх частот, багатоканального АЦП та мікроконтролера (МК) [3-5]. У даній роботі розглядаються тільки вимірювальні прилади (ВП) з частотою дискретизації кратною частоті мережі. Такий вид дискретизації найбільш ефективний за необхідності вимірювання фазових співвідношень між напругами та/або струмами, зокрема під час вимірювання симетричних складових, які необхідні для аналізу показників якості електроенергії [6], активної і реактивної потужностей, і забезпечується помножувачем частоти (ПЧ) вхідного сигналу. Відзначимо, що в таких ВП для обчислення параметрів гармонік вельми ефективно використовується дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) та його варіант – швидке перетворення Фур'є (ШПФ).

Метою роботи є розробка методів корекції адитивних, мультиплікативних та фазових похибок, які виникають в реактивних елементах (ємностях, трансформаторах) вхідних ланцюгів і аналогових фільтрах нижніх частот (ФНЧ) перед АЦП, які необхідні для обмеження смуги частот вхідних сигналів для відповідності умовам теореми Котельнікова та для запровадження дискретного перетворення Фур'є, і створення на їхній основі структурних схем для обробки сигналів у засобах вимірювання параметрів електроенергії.

Основні матеріали дослідження. На рис. 1 наведено узагальнену структурну схему ВП, що має декілька вхідних каналів. Кожний канал складається з масштабного перетворювача МП (включаючи ДН або ПСН) та АЦП і має мультиплікативну γ , адитивну ΔU й фазову $\Delta\phi$ похибку. Фазова похибка відображена як поворот вектора $\exp(j\Delta\phi)$. Вихідними параметрами ВП є ортогональні складові гармонік, представлені у вигляді комплексної

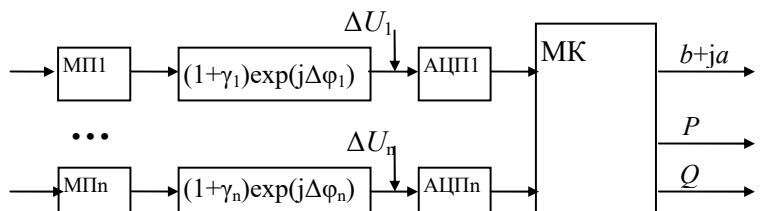


Рис. 1

© Карасинський О.Л., Тесик Ю.Ф., 2021
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-5323-8106> ; ** <https://orcid.org/0000-0001-6567-1436>

величини $b + ja$, активна P і реактивна потужності Q тощо.

Розглянемо один з каналів. У відповідності зі схемою, сигнал на вході АЦП $u(t)$ у момент часу t описується виразом

$$u(t) = \Delta U + K\sqrt{2} \sum_k U_k (1 + \gamma_k) \sin\left(\frac{2\pi kt}{T} + \psi_k + \Delta\phi_k\right), \quad (1)$$

де K – коефіцієнт передачі МП; U_k і ψ_k – діюче значення та початковий кут зсуву фази k -ої гармоніки; T – період основної (першої) гармоніки сигналу; ΔU , γ_k , $\Delta\phi_k$ – адитивна, мультиплікативна і фазова похибки, які згадувалися вище.

Можливі кілька варіантів послідовності кодування вхідних сигналів. Одночасне кодування у разі використання багатоканальних АЦП, наприклад [7], або та чи інша послідовність комутації сигналів на вході АЦП з N_c циклів. У ЛЕЕ або у ВП для вимірювання кутів зсуву фази (КЗФ) найбільш ефективно розташовувати вибірку струму посередині двох однойменних вибірок напруги [8, 9] (рис. 2). За неодновременного кодування вхідних сигналів частота дискретизації кожного сигналу в N разів менше, ніж частота на виході ПЧ; для кожного каналу запроваджується поняття зміщення відліку n_1 від початку циклу з N_c тактів. У такому каналі n -ий відлік відповідає моменту часу

$$t_n = (n_1 + n \cdot N_c) \cdot T_d, \quad (2)$$

де T_d – період імпульсів на виході ПЧ, який визначається виразом

$$T_d = T / (N_c \cdot N), \quad (3)$$

де N – кількість відліків кожного з сигналів на періоді T основної частоти (першої гармоніки).

Корекція мультиплікативної похибки γ коефіцієнта передачі вимірювального каналу виконується в процесі налаштування шляхом введення відповідного поправочного коефіцієнту для **кожного** каналу та, якщо МП перемикається в залежності від діапазону вхідних сигналів, то й для **кожного** діапазону. У підсумку виходять дві таблиці поправочних коефіцієнтів для напруг K_U і для струмів K_I розмірністю $N_{\text{фаз}} \times N_{\text{диап}U}$ та $N_{\text{фаз}} \times N_{\text{диап}I}$, відповідно, де $N_{\text{фаз}}$ – кількість фаз у ВП (три або одна), $N_{\text{диап}U}$ і $N_{\text{диап}I}$ – кількість діапазонів, що перемикаються в МП для напруги та струму, відповідно.

Корекція адитивної похибки ΔU в схемах з підстроюванням періоду дискретизації за допомогою ПЧ. Результат ДПФ для k -ої гармоніки залежить тільки від діючого значення та початкового кута зсуву фази гармоніки, що обчислюється, тому похибка ΔU не впливає на ці результати.

Під час обчислення суми добутку вибірок напруги та струму, які необхідні для обчислення активної та реактивної потужностей S_p і S_Q , є можливість корекції адитивної похибки. Наприклад, для активної потужності маємо

$$S_p = \frac{1}{N} \sum_n u(t_n) \cdot i(t_n) = \frac{1}{N} \sum_n (\Delta U + \sqrt{2} \sum_k U_k \cdot \sin(k\omega t_n + \psi_{Uk})) \cdot (\Delta I + \sqrt{2} \sum_k I_k \cdot \sin(k\omega t_n + \psi_{Ik})), \quad (4)$$

де t_n – моменти вибірки напруг і струмів відповідно до формул (2) та (3), $\omega = 2\pi / T$.

Вираз (4) можна представити у вигляді

$$S_p = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_n (\Delta U \cdot \sum_k I_k \cdot \sin(k\omega t_n + \psi_{Ik})) + \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_n (\Delta I \cdot \sum_k U_k \cdot \sin(k\omega t_n + \psi_{Uk})) + \frac{1}{N} \sum_n \Delta U \cdot \Delta I + \frac{2}{N} \sum_n (\sum_k U_k \cdot \sin(k\omega t_n + \psi_{Uk})) \cdot (\sum_k I_k \cdot \sin(k\omega t_n + \psi_{Ik})) \quad (5)$$

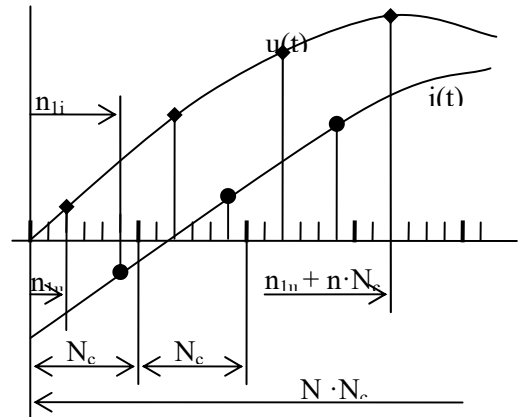


Рис. 2

У (5) для першого та другого доданків змінюємо порядок підсумовування та отримаємо

$$S_P = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta U}{N} \sum_k (I_k \cdot \sum_n \sin(k\omega t_n + \psi_{Ik})) + \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta I}{N} \sum_k (U_k \cdot \sum_n \sin(k\omega t_n + \psi_{Uk})) + \Delta U \cdot \Delta I + \frac{2}{N} \sum_n (\sum_k U_k \cdot \sin(k\omega t_n + \psi_{Uk})) \cdot (\sum_k I_k \cdot \sin(k\omega t_n + \psi_{Ik})) \quad (6)$$

У (6) для першого та другого доданків внутрішні суми складаються з N доданків k -ої гармоніки в моменти часу (2), такі суми дорівнюють нулю. Тому залишаються тільки третій доданок, що дорівнює добутку зсувів нуля в каналах напруги та струму, і четвертий доданок, який дорівнює згаданому значенню активної потужності P . Легко помітити, що усереднене значення суми відліків сигналів (1) у моменти часу (2) на періоді T дорівнює адитивній похибці, тобто

$$\Delta U = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(t_n), \quad \Delta I = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(t_n). \quad (7)$$

Формули обчислення реактивної потужності S_Q аналогічні формулам (4)-(7) за винятком того, що береться добуток n -ої вибірки напруги $u(t_n)$ та вибірки струму, зсушеної на чверть періоду $i(t_{n+N/4})$ [9].

Таким чином, формули для розрахунку активної та реактивної потужностей набувають наступного вигляду:

$$P = K_P \left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_{cp}(t_n) \cdot i(t_n) - \Delta_{UI} \right), \quad Q = K_P \left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_{cp}(t_n) \cdot i(t_{n+N/4}) - \Delta_{UI} \right), \quad (8)$$

де $\Delta_{UI} = \Delta_U \cdot \Delta_I$ обчислюється з використанням формул (7), K_P – масштабний коефіцієнт, що дорівнює

$$K_P = K_U \cdot K_I \cdot K_N, \quad (9)$$

де $K_N = 1/\cos(\pi/N)$ [8, 9].

Корекцію зсуву нуля під час обчислення діючих значень напруг та струмів також можна здійснити шляхом віднімання з суми квадратів вибірок квадрата Δ_U або Δ_I

$$U = K_U \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u^2(t_n) - (\Delta_U)^2}, \quad I = K_I \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i^2(t_n) - (\Delta_I)^2}. \quad (10)$$

Формули (10) еквівалентні тому, що від діючого значення віднімається діюче значення нульової гармоніки, тобто постійна складова. Зауважимо, що розгляд фазових похибок для діючих значень не має сенсу. Слід зазначити, що для формул (8) та (10) віднімання постійних складових Δ_U , Δ_U , Δ_I виконується до множення на масштабний коефіцієнт.

Під час дослідження **фазової похибки** важливі не абсолютні значення цих похибок у каналах, а їхні різниці, які впливають на відповідний параметр. Наприклад, у разі вимірювання кута зсуву фази між струмом та напругою результат ψ_{UI} і похибка $\Delta\phi_{UI}$ дорівнюватимуть

$$\psi_{UI} = \psi_U - \psi_I, \quad \Delta\phi_{UI} = \Delta\phi_U - \Delta\phi_I. \quad (11)$$

За вимірювання активної та реактивної потужностей вплив фазової похибки $\Delta\phi_{UI}$ можна розглянути на прикладі напруги та струму синусоїдальної форми. Виміряні значення цих потужностей дорівнюють

$$X_P = U \cdot I \cdot \cos(\psi_{UI} + \Delta\phi_{UI}) = U \cdot I \cdot \cos(\psi_{UI}) \cdot \cos(\Delta\phi_{UI}) - U \cdot I \cdot \sin(\psi_{UI}) \cdot \sin(\Delta\phi_{UI}), \quad (12)$$

$$X_Q = U \cdot I \cdot \sin(\psi_{UI} + \Delta\phi_{UI}) = U \cdot I \cdot \sin(\psi_{UI}) \cdot \cos(\Delta\phi_{UI}) + U \cdot I \cdot \cos(\psi_{UI}) \cdot \sin(\Delta\phi_{UI}).$$

З огляду на те, що $P = U \cdot I \cdot \cos(\psi_{UI})$ та $Q = U \cdot I \cdot \sin(\psi_{UI})$, формули (12) легко виразити через істинні значення активної та реактивної потужностей

$$X_P = P \cdot \cos(\Delta\varphi_{UI}) - Q \cdot \sin(\Delta\varphi_{UI}), \quad X_Q = Q \cdot \cos(\Delta\varphi_{UI}) + P \cdot \sin(\Delta\varphi_{UI}). \quad (13)$$

Корекція фазової похибки шляхом зсуву моменту запуску АЦП. На рис. 3 пунктирною лінією показано ідеальну криву сигналу, а суцільною – сигнал на вході АЦП. Якщо запуск АЦП виконувати з деяким зсувом на величину Δt щодо моментів часу (2), то для n -го відліку $u(t)$ отримаємо кодоване значення n -ої вибірки сигналу

$$u(t_n + \Delta t) = \sqrt{2} \sum_k U_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T} \left(\frac{n_1 + n \cdot N_c}{N_c \cdot N} T + \Delta t\right) + \psi_k + \Delta\varphi_k\right). \quad (14)$$

Щоб не ускладнювати подальший виклад, у формулі (14) в порівнянні з (1) відкинуті мультиплікативна та адитивна похибки від зсуву нуля. Перетворення аргументу функції синуса в (14) дає значення кута α_n

$$\alpha_n = \frac{2\pi k}{N_c \cdot N} (n_1 + n \cdot N_c) + \frac{2\pi k}{T} \Delta t + \psi_k + \Delta\varphi_k. \quad (15)$$

З усього різноманіття параметрів електричної мережі одними з найбільш важливих є параметри першої гармоніки. Тому, якщо в процесі налаштування ВП встановити (запрограмувати) зсув запуску АЦП за умови

$$\frac{2\pi}{T} \Delta t = -\Delta\varphi_1 \quad \text{або} \quad \Delta t = -T \cdot \Delta\varphi_1 / 2\pi, \quad (16)$$

то з'являється можливість компенсувати фазову похибку для першої гармоніки. Наприклад, за $\Delta\varphi_1 = -$

0.1° та $T = 20$ ms необхідний зсув запуску АЦП $\Delta t = 5.6$ μ s. Відзначимо, що діапазон завдання Δt зменшується зі збільшенням кількості відліків на періоді сигналу T . Якщо припустити зміну Δt не більше, ніж на 10% від інтервалу $T/(N \cdot N_c)$, то для періоду сигналів в електричній мережі рівному 20 ms отримаємо наступну таблицю припустимих значень Δt і, відповідно, значень корекції кутів $\Delta\varphi$ (табл.).

N	N_c	$N \cdot N_c$	Td [μ s]	Δt [μ s]	$\Delta\varphi$ [град]
32	6	192	104	10	0.18
64	6	384	52	5.2	0.094
128	6	768	26	2.6	0.047

Слід також зазначити проблематичність використання цього методу за одночасного кодування всіх сигналів. У цьому випадку можливо штучно рознести в часі кодування вибірок всіх напруг в парному такті та кодування вибірок всіх струмів у непарному. Зазвичай МП для конкретного виду сигналів будуються за однаковою схемою та за правильного проектування відмінності в каналах напруги мінімальні. Те ж саме стосується й каналів струму. Тому й можливий варіант корекції фазової похибки між каналами напруги та струму за послідовного кодування для схеми за $N_c = 2$.

Проте, за малих значень $N \leq 32$ цей метод корекції фазових похибок досить ефективний. По-перше, фактично коригується групова затримка у каналі, що дає можливість коригувати фазові похибки під час вимірювання кута зсуву фаз вищих гармонік. По-друге, ми отримуємо вибірки АЦП вже скориговані по фазі, й їх можна набагато простіше використовувати для розрахунку параметрів. **Корекція фазової похибки шляхом повороту вектора** заснована на відомому методі повороту осей і перетворення координат вектора [10] (рис. 4). Під час повороту осей координат (X, Y) на кут α отримуємо нову систему координат (X', Y') , у якій вихідні координати (x_1, y_1) вектора V перетворюються в нові координати (x_2, y_2) відповідно до формул

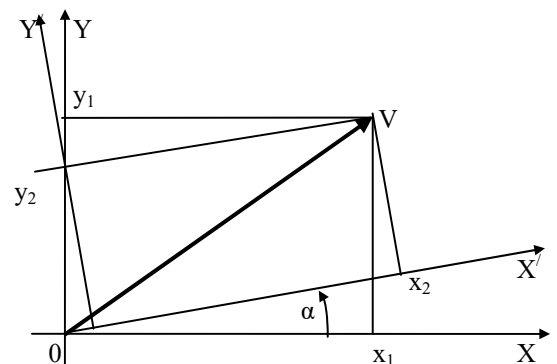


Рис. 4

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 \cdot \cos(\alpha) + y_1 \cdot \sin(\alpha), \\y_2 &= -x_1 \cdot \sin(\alpha) + y_1 \cdot \cos(\alpha).\end{aligned}\tag{17}$$

Справедливо також зворотне перетворення від системи координат (X', Y') у систему (X, Y), яке відповідає повороту в зворотній бік на кут $-\alpha$

$$\begin{aligned}x_1 &= x_2 \cdot \cos(\alpha) - y_2 \cdot \sin(\alpha), \\y_1 &= x_2 \cdot \sin(\alpha) + y_2 \cdot \cos(\alpha).\end{aligned}\tag{18}$$

Розглянемо першу гармоніку сигналу (1) на вході АЦП

$$u(t) = kU \sin(\omega t + \psi + \Delta\varphi),\tag{19}$$

де коефіцієнт k включає в себе корекцію мультиплікативної похибки коефіцієнта передачі МП і тому є індивідуальним для кожного каналу.

Сигналу (19) відповідає вектор \mathbf{V} і його ортогональні складові (x_1, y_1) , які обчислюються за допомогою ДПФ вибірок миттєвих значень сигналів

$$\dot{V} = x_1 + j \cdot y_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cdot \exp(j \cdot \arctg(y_1 / x_1)),\tag{20}$$

$$x_1 = k \cdot U \cdot \cos(\psi + \Delta\varphi), \quad y_1 = k \cdot U \cdot \sin(\psi + \Delta\varphi).\tag{21}$$

Фазова корекція здійснюється поворотом вектора \mathbf{V} на кут $\alpha = -\Delta\varphi$. У результаті, згідно з (17), отримуємо нові координати вектора \mathbf{V}

$$\begin{aligned}x_2 &= k \cdot U \cdot \cos(\psi + \Delta\varphi) \cdot \cos(\Delta\varphi) - k \cdot U \cdot \sin(\psi + \Delta\varphi) \cdot \sin(\Delta\varphi) = k \cdot U \cdot \cos(\psi), \\y_2 &= k \cdot U \cdot \sin(\psi + \Delta\varphi) \cdot \cos(\Delta\varphi) + k \cdot U \cdot \cos(\psi + \Delta\varphi) \cdot \sin(\Delta\varphi) = k \cdot U \cdot \sin(\psi).\end{aligned}\tag{22}$$

Із (22) видно можливість корекції фазової похибки. У реальних ВП коригувальні коефіцієнти зручно вводити як деякі цифри d_1 і d_2 в діапазоні ± 0.1 , що відповідає корекції в діапазоні $\pm 10\%$. Коефіцієнт d_1 відповідає корекції мультиплікативної похибки

$$k = K(1 + d_1),\tag{23}$$

а коефіцієнт d_2 коригує фазову похибку. У такому разі використовується апроксимація тригонометричних функцій за малого кута

$$\cos(\Delta\varphi) \approx 1 - d_2^2 / 2, \quad \sin(\Delta\varphi) \approx d_2.\tag{24}$$

Використовуючи вирази (23) і (24), формули (22) перетворюються до вигляду

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 \cdot K \cdot (1 + d_1)(1 - d_2^2 / 2) - y_1 \cdot K \cdot (1 + d_1) \cdot d_2, \\y_2 &= -x_1 \cdot K \cdot (1 + d_1) \cdot d_2 + y_1 \cdot K \cdot (1 + d_1)(1 - d_2^2 / 2).\end{aligned}\tag{25}$$

Введемо позначення

$$K_1 = K \cdot (1 + d_1)(1 - d_2^2 / 2), \quad K_2 = K \cdot (1 + d_1) \cdot d_2\tag{26}$$

і представимо вирази (25) з урахуванням (26) в матричній формі

$$\begin{bmatrix}x_2 \\ y_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}K_1 & K_2 \\ -K_2 & K_1\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}x_1 \\ y_1\end{bmatrix}.\tag{27}$$

Коефіцієнти K_1 і K_2 обчислюються та заносяться в постійний запам'ятовуючий пристрій єдиний раз під час налаштування ВП. Форма їхнього подання (27) дає змогу відразу враховувати похибку коефіцієнта передачі та фазову похибку, що мінімізує обсяг обчислень у разі корекції.

Корекцію під час вимірювання активної і реактивної потужності розглянемо на прикладі однієї з фаз. Отримані результати вимірювання активної та реактивної потужності без корекції фазової похибки $\Delta\varphi_{UL}$ виражаються формулами (13), які тут повторимо з перестановкою порядку підсумовування для X_P і X_Q

$$X_P = P \cdot \cos(\Delta\varphi_{UI}) - Q \cdot \sin(\Delta\varphi_{UI}), \quad X_Q = P \cdot \sin(\Delta\varphi_{UI}) + Q \cdot \cos(\Delta\varphi_{UI}). \quad (28)$$

Видно повну аналогію цих формул з формулами (17). Це природно, тому що повну потужність можна представити у вигляді вектора, який також можна розглядати в системі координат, яка повернена на кут $\Delta\varphi_{UI}$. Розглядаючи (28) як систему рівнянь щодо P і Q , отримуємо

$$P = X_P \cdot \cos(\Delta\varphi_{UI}) + X_Q \cdot \sin(\Delta\varphi_{UI}), \quad Q = -X_P \cdot \sin(\Delta\varphi_{UI}) + X_Q \cdot \cos(\Delta\varphi_{UI}). \quad (29)$$

Задля корекції вимірних значень використовуються коефіцієнти для напруги K_U , d_{U1} , d_{U2} та струму K_I , d_{I1} , d_{I2} . Обчислюємо допоміжні величини

$$K_P = K_U \cdot K_I \cdot K_N, \quad d_1 = (1 + d_{U1}) \cdot (1 + d_{I1}), \quad d_2 = d_{U2} - d_{I2}, \quad (30)$$

де K_N враховує методичну похибку (див. вище). Остаточні поправочні коефіцієнти будуть

$$K_1 = K_P \cdot d_1 \cdot (1 - d_2^2 / 2), \quad K_2 = K_P \cdot d_1 \cdot d_2, \quad (31)$$

а скоригований результат вимірювання активної та реактивної потужності можна представити у матричній формі

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ -K_2 & K_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_P \\ X_Q \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Відзначимо, що у разі вимірювання активної і реактивної потужностей корекція мультиплікативної та фазової похибок виконується для **кожної фази** окремо, а сумарні значення потужностей в трифазній мережі обчислюються з використанням скоригованих значень для фаз.

Перевагою методу повороту вектора є великий діапазон корекції фазових похибок, який не залежить від кількості вибірок сигналу на його періоді. За завдання величин d_1 і d_2 в межах ± 0.1 можна отримати діапазон регулювання кута зсуву фази приблизно $\pm 5^\circ$ та діапазон корекції мультиплікативної похибки $\pm 10\%$. Деяким недоліком є те, що фазова корекція відноситься тільки до кутів зсуву фази першої гармоніки.

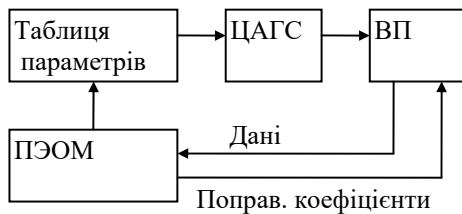


Рис. 5

За допомогою ПЕОМ можна автоматизувати процес налаштування ВП. Блок-схему цього процесу наведено на рис. 5. У ПЕОМ задається таблиця з нормованими значеннями вимірюваних параметрів. Ці параметри у вигляді набору діючих значень і кутів зсуву фаз трифазних систем напруг та струмів передаються в цифро-аналоговий генератор сигналів (ЦАГС), до виходів якого підключений ВП, що налаштовується. ПЕОМ зчитує дані з ВП, порівнює їх з табличними значеннями, розраховує значення поправочних коефіцієнтів та заносить в ВП. За досягнення умови, що

похибка вимірювання менше припустимого значення похибки $\Delta < \Delta_{\text{доп}}$, процес налаштування каналу або діапазону закінчується.

Висновки. Розроблені методи корекції похибок ВП для вимірювання параметрів електричних мереж дають змогу суттєво підвищити точність цих приладів. Причому ефект підвищення точності досягається програмними методами шляхом використання наведених вище алгоритмів цифрової обробки сигналів. Моделювання ВП та експериментальна перевірка на макетах ВП показали можливість підвищення точності вимірювання активної та реактивної потужності до 0.02% і вище.

1. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods (IEC 61000-4-30:2008).
2. IEC 62058-11:2008. Electricity metering equipment (a.c.) - Acceptance inspection – Part11:General acceptance inspection methods (IEC 62058-11:2008 (MOD)).
3. Zhaomin Shi, Jiangtao Zhang, Xianlin Pan, Qing He, Jun Lin. Establishment of AC Power Standard at Frequencies up to 100 kHz. 22nd IMEKO TC4 Symposium and 20th International Workshop on ADC Modelling and Testing: Supporting world development through electric&electronic measurements. Iași, Romania, 14-15 September 2017. Pp. 219-223.
4. Zhang J., Pan X., Jun Lin, Wang L., Lu Z., Zhang D. A new method for measuring the level dependence of as shunts. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2010. Vol. 59. No 1. Pp. 140-144.

- DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2022110>
5. Chen D., Yang W., Pan M. Design of impedance measuring circuits based on phase-sensitive demodulation technique. *IEEE Trans. Instr. Meas.* 2011. Vol. 60. No 4. Pp. 1276-1282.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2084770>
 6. Брайко В.В., Гринберг И.П., Карасинский О.Л., Таранов С.Г., Тесик Ю.Ф., Хусид Р.Б. К вопросу об определении симметричных составляющих и несинусоидальности напряжений трехфазной сети на ЭВМ. *Проблемы техн. электродинамики.* 1979. Вып.70. С.74-78.
 7. Data Sheet AD7656/AD7657/AD7658. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7656_7657_7658.pdf (дата звернення 10.01.2020).
 8. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Алгоритм измерения мощности, ориентированный на реализацию в микроконтроллерах. *Технічна електродинаміка.* 2001. № 1. С.76-78.
 9. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Алгоритм измерения реактивной мощности, ориентированный на реализацию в микроконтроллерах. *Технічна електродинаміка.* 2001. № 4. С.76-78.
 10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1977. 832 с.

CORRECTION OF ERRORS IN INSTRUMENTS OF MEASURING ELECTRIC POWER PARAMETERS

O.L. Karasinskiy, Yu.F. Tesyk

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: pribor@ied.org.ua

A study of methods for correcting amplitude and phase errors in devices for measuring the parameters of electric power with digital signal processing with a sampling frequency multiple of the network frequency was made. The generalized flow diagram of measuring device that consists of a few entrance channels was presented. Mathematical expositions that explain the process of correction of additive and multiplicative errors are given. Through a temporal diagram a few variants of encoding of entrance signals are shown. The possibility of correcting phase errors by shifting the moment of the ADC start-up and by turning the axes and transforming the coordinates of the voltage and current vectors is shown. The possibility of correction when measuring the reactive and reactive powers is investigated. References 11, figures 5, table 1.

Keywords: error correction, devices, electrical networks, analog-to-digital conversion, sampling vector coordinate rotation.

1. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods (IEC 61000-4-30:2008).
2. IEC 62058-11:2008. Electricity metering equipment (a.c.) - Acceptance inspection – Part11:General acceptance inspection methods (IEC 62058-11:2008 (MOD)).
3. Zhaomin Shi, Jiangtao Zhang, Xianlin Pan, Qing He, Jun Lin. Establishment of AC Power Standard at Frequencies up to 100 kHz. 22nd IMEKO TC4 Symposium and 20th International Workshop on ADC Modelling and Testing: Supporting world development through electric&electronic measurements. Iasi, Romania, 14-15 September 2017. Pp. 219-223.
4. Zhang J., Pan X., Jun Lin, Wang L., Lu Z., Zhang D. A new method for measuring the level dependence of as shunts. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2010. Vol. 59. No 1. Pp. 140-144.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2022110>
5. Chen D., Yang W., Pan M. Design of impedance measuring circuits based on phase-sensitive demodulation technique. *IEEE Trans. Instr. Meas.* 2011. Vol. 60. No 4. Pp. 1276-1282.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2084770>
6. Brayko V.V., Grinberg I.P., Karasinskiy O.L., Taranov V.V., Tesyk Yu.F., Khusid R.B. To the question of determining the symmetrical components and non-sinusoidality of the voltages of a three-phase network on computer. *Problemy Tekhnicheskoy Elektrodynamiki.* 1979. Vol.70. Pp.74-78. (Rus)
7. Data Sheet AD7656/AD7657/AD7658. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7656_7657_7658.pdf (accessed at 10.01.2020)
8. Karasinskiy O.L., Tesyk Yu.F. The algorithm for measuring power focused on implementation in microcontrollers. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2001. No 1. Pp.76-78. (Rus)
9. Karasinskiy O.L., Tesyk Yu.F. Reactive power measurement algorithm focused on implementation in microcontrollers. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2001. No 4. Pp.76-78. (Rus)
10. Korn G., Korn T. Mathematical Handbook for scientists and engineers. Moskva: Nauka, 1977. 832 p.

Надійшла 11.03.2020.

Остаточний варіант 15.10.2020