

УДК 623.004.67

О.А. Орлова

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВИХ ЗСУВІВ ПІДВИЩЕНОЇ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ НА ОСНОВІ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛУ

*В статті проаналізовані методи вимірювання фазових зсувів на основі цифрової обробки сигналу, які використовуються для усунення впливу вищих гармонік та завад, що присутні у сигналі. Розглядаються кореляційний та взаємно кореляційний методи вимірювання.*

**Ключові слова:** фазовий зсув, кореляційний метод, взаємно кореляційний метод, заводозахищеність.

### Вступ

**Постановка задачі.** Широке поширення у світі мають цифрові прилади, зокрема цифровий часоімпульсний фазометр. Вищі гармоніки та завади, що присутні у сигналах, вносять значний вплив у результат вимірювання, що викривлює інформацію. Розглянуті у статті методи вимірювання фазових зсувів є важливою науково-технічною задачею, актуальність якої підтверджується необхідністю підвищення заводозахищеності у інформаційно-вимірвальних системах.

**Аналіз літератури.** У відомій літературі [1 – 5] розглянуті основні алгоритми цифрової обробки сигналів, які визначаються методами вимірювання відповідних величин, а також представлені методи вимірювання фазових зсувів.

Так у [1, 4] представлений принцип побудови цифрових фазометрів та їх принцип дії.

У [2] розглянуті кореляційний та взаємно кореляційний методи вимірювання фазових зсувів.

У [3] розглянуті питання покращення технічних параметрів випрямляючих та транзисторних приладів.

У [5] розглянуті похибки вимірювань та їх класифікація. Але в запропонованій літературі не досліджуються методи вимірювання фазових зсувів підвищеної заводозахищеності на основі цифрової обробки сигналу.

**Метою статті** є аналіз методів вимірювання фазового зсуву, який би виключав вплив завад у сигналі, у відносно невеликий проміжок часу та без методичних похибок.

### Основний матеріал

При вимірюванні фазових зсувів стикаються з такою проблемою, як завади, що присутні у сигналах. Гармоніки можуть суттєво вплинути на результат вимірювання часоімпульсних фазометрів [1].

Найбільш ефективними для компенсації впливу вищих гармонік і підвищення заводозахищеності є кореляційні методи вимірювання фазових зсувів [2].

Цифрові фазометри (ЦФ), які мають високу заводозахищеність, можна побудувати з використанням алгоритмів кореляційної та взаємно кореляційної обробки сигналів. Принцип дії таких фазометрів побудований на вимірюванні або ж безпосередньо початкових фаз відповідних гармонік вхідних сигналів, або на вимірюванні квадратурних амплітуд гармонік, що становлять, з подальшим обчисленням початкових фаз.

Знаючи початкові фази, знаходять фазовий зсув між відповідними гармоніками вхідних сигналів [3]. Початкова фаза пов'язана з квадратурними співвідношеннями, що становлять

$$\psi = \arctg\left(\frac{U_{VY}}{U_{VX}}\right) = \arcsin\left(\frac{U_{VY}}{\sqrt{U_{VX}^2 + U_{VY}^2}}\right), \quad (1)$$

де  $U_{VX}$  – вхідна напруга;

$U_{VY}$  – вихідна напруга.

У загальному вигляді структурна схема заводозахищеного фазометра, що реалізує кореляційний метод, показана на рис. 1, а. У його роботі можна виділити три етапи.

На першому етапі через вхідний пристрій 1 (ВП1), вхідний пристрій 2 (ВП2) та комутатор (К) на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) по черзі подаються сигнали, пропорційні напрузі  $u(t)$  і струму  $i(t)$  в досліджуваному ланцюзі. Коди з виходу АЦП надходять до вимірника квадратурних складових (ВКС), де вони піддаються цифровій обробці.

На другому етапі арифметичний пристрій (АП) здійснює перерахунок квадратурних складових у початкові фази.

Третій етап зводиться до визначення фазового зрушення між відповідними гармоніками.

Абсолютна похибка вимірювання початкової фази  $\Delta\psi_v$  пов'язана з абсолютними похибками вимірювання квадратурних складових  $\Delta U_{VX}$  і  $\Delta U_{VY}$  співвідношенням [2]:

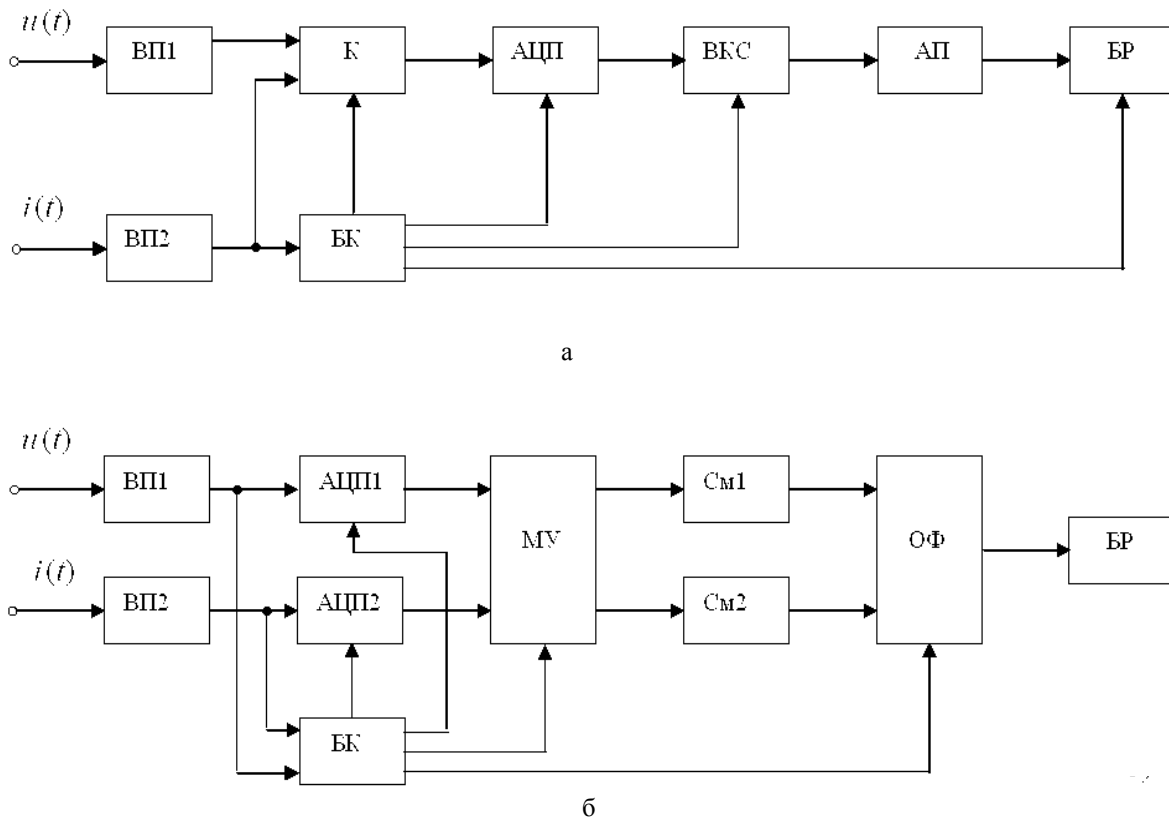


Рис. 1. Структурні схеми кореляційного (а) та взаємно кореляційного (б) цифрового фазометрів

$$\Delta\psi_v = \frac{(U_{vx}\Delta U_{vy} + U_{vy}\Delta U_{vx})}{(U_{vx}^2 + U_{vy}^2)} \quad (2)$$

Оскільки

$$U_{vx} = U_{v\max} \cos \psi_v$$

і

$$U_{vy} = U_{v\max} \sin \psi_v,$$

то

$$\Delta\psi_v = \frac{(\Delta U_{vx} \sin \psi_v + \Delta U_{vy} \cos \psi_v)}{U_{v\max}} \quad (3)$$

Оцінка похибки по максимуму, що незалежна від кута  $\psi_v$ ,

$$\Delta\psi_{v\max} \leq \sqrt{(\Delta U_{vx})^2 + (\Delta U_{vy})^2} / U_{v\max} \quad (4)$$

Взаємно кореляційний метод вимірювання фазових зсувів зводиться до визначення взаємно кореляційної функції [1]. Для синусоїдальних сигналів, навіть за наявності в них некорельованих завад  $R = UI \cos(\varphi - \beta)$ . Якщо взаємно кореляційну функцію  $R$  зміряти при двох значеннях фазового кута  $\beta$ , які позначимо  $\beta_1$  та  $\beta_2$ , то

$$\begin{aligned} R_1 &= UI \cos(\varphi - \beta_1); \\ R_2 &= UI \cos(\varphi - \beta_2). \end{aligned} \quad (5)$$

З цих співвідношень знаходимо фазовий зсув

$$\varphi = \frac{\arctg(R_1 \cos \beta_2 - R_2 \cos \beta_1)}{(R_2 \sin \beta_2 - R_1 \sin \beta_1)} \quad (6)$$

Похибка вимірювання фазового зсуву даним способом, при використанні цифрової обробки сигналів, зумовлена, в основному, неточністю вимірювання взаємно кореляційних функцій  $R_1$  та  $R_2$ :

$$\Delta\varphi = \frac{[\Delta R \cos(\varphi - \beta_2) - \Delta R \cos(\varphi - \beta_1)]}{UI \sin(\beta_1 - \beta_2)} \quad (7)$$

Оцінюючи похибку  $\Delta\varphi$  для всіх можливих значень кута  $\varphi$ , отримуємо

$$\begin{aligned} |\Delta\varphi| \leq |\Delta\varphi_{\max}| &= \frac{1}{UI \sin|\beta_1 - \beta_2|} \times \\ &\times \sqrt{\Delta R_1^2 + \Delta R_2^2 + 2|\Delta R_1||\Delta R_2|\cos(\beta_1 - \beta_2)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Як видно з цього співвідношення, найменше значення граничної похибки  $|\Delta\varphi|$  досягається при  $\beta_1 - \beta_2 = \pm\pi/2$ :

$$|\Delta\varphi|_{\max} = \sqrt{\Delta R_1^2 + \Delta R_2^2} / (UI) \quad (9)$$

З точки зору простоти технічної реалізації приладу логічно вибрати або  $\beta_1 = 0$  і  $\beta_2 = \pi/2$ , або  $\beta_1 = -\beta_2 = \beta = \pi/4$ .

В першому випадку

$$\varphi = \arctg(R_2 / R_1), \quad (10)$$

а в другому –

$$\varphi = \arctg[(R_1 - R_2) / (R_1 + R_2)]. \quad (11)$$

В обох випадках забезпечується мінімальне значення похибки  $\Delta\varphi$ .

Проте при числі миттєвих значень  $n > 4$  в першому випадку  $n > 8$  в другому дискретизацію сигналів необхідно проводити за декілька періодів, розподіливши відповідним чином моменти дискретизації.

Це приводить до збільшення часу вимірювання і деякому ускладненню схеми дискретизатора.

Якщо виконати умову

$$|\beta_1| = |\beta_2| < 2\pi / n,$$

то похибка вимірювання  $\Delta\varphi$  не буде мінімальною.

Структурна схема цифрового фазометра, що реалізує взаємно кореляційний метод цифрової обробки сигналів, показана на рис. 1, б.

Сигнали  $u(t)$ ,  $i(t)$  надходять на ВП1 та ВП2, далі на АЦП1, АЦП2 і блок керування (БК), який задає моменти дискретизації вхідних сигналів:  $\omega t_q$  – для напруги  $i(\omega t_q \pm \beta)$  – для струму, а також синхронізує роботу решти вузлів приладу. Коди миттєвих значень напруги  $u(\omega t_q)$  і струму  $i(\omega t_q \pm \beta)$  поступають на мікропроцесор МП, а з двох виходів останнього коди перемножених  $u(\omega t_q)$  та  $i(\omega t_q - \beta)$ ;  $u(\omega t_q)$  та  $i(\omega t_q + \beta)$  з урахуванням знаку вводяться в реверсивні суматори  $См1$  та  $См2$ . В результаті цифрової обробки кодів  $m$  миттєвих значень вхідних сигналів в суматорах будуть зафіксовані коди взаємно корельованих функцій  $R_1, R_2$ .

Після цього, за сигналом БК, коди величин  $R_1$  та  $R_2$  переносяться з суматорів в обчислювач фази ОФ, в якому й визначається фазовий зсув.

## Висновок

1. Принцип дії фазометрів, які засновані на кореляційному та взаємно кореляційному алгоритмах обробки сигналів, полягає у вимірюванні початкових фаз відповідних гармонік вхідних сигналів та на вимірюванні квадратурних складових амплітуд вищих гармонік, з послідовним обчисленням початкових фаз.

2. Проаналізовані у статті методи вимірювання фазових зсувів виключають вплив завад у сигналі та є ефективними, так як суттєво зменшують похибки.

## Список літератури

1. Чинков В.М. Цифрові засоби вимірювальної техніки військового призначення: підручник. Ч. 1 / В.М. Чинков. – Х.: ХУПС, 2007. – 244 с.
2. Горлач А.А. Цифрова обробка сигналів у вимірювальній техніці / А.А. Горлач, М. Я. Мінц, В. М. Чинков. – К.: Техніка 1985. – 151 с.
3. Мінц М.Я. Аналіз впливу нелінійних викривлень на точність визначення зсуву фаз між основними гармоніками / М.Я. Мінц, Г.Н. Кучеренко // Сб. наук. тр. – Л.: ВНІІ електр. вим. пристроїв, 1970. – С. 364-368.
4. Смірнов П.Т. Цифрові фазометри. – Л.: Енергія, Ленінгр. від-ня, 1974. – 144 с.
5. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник. – Х.: ХВУ, 2001. – 424 с.

Надійшла до редколегії 8.09.2010

**Рецензент:** канд. техн. наук, доц. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

Е.А. Орлова

*В статье проанализированы методы измерения фазового сдвига на основе цифровой обработки сигнала, которые применяются для устранения влияния высших гармоник и помех, которые присутствуют в сигнале. Рассматриваются корреляционный и взаимокорреляционный методы измерения.*

**Ключевые слова:** фазовый сдвиг, корреляционный метод, взаимокорреляционный метод, помехоустойчивость.

## ANALYS OF METHODS OF PHASE MEASUREMENT OF SHIFTS RAISED OF THE NOISE STABILITY ON THE BASIS OF DIGITAL PROCESSING OF THE SIGNAL

О.А. Orlova

*In article analysed methods of measurement of phase shift is investigated on the basis of digital processing of a signal, which are applied to elimination of influence of the higher harmonics and hindrances, which are present at a signal. In article considered correlation and intercorrelation measurement methods.*

**Keywords:** phase shift, a correlation method, intercorrelation method, a noise stability.