

С. В. ГУБІН¹, С. О. ТИШКО², О. Є. ЗАБУЛА³, Ю. М. ЧЕРНИЧЕНКО³¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна² Харківське ПГЗ-ДКАУ, Україна³ Національна Академія НГУ, Україна

ОСЦИЛОГРАФІЧНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВОГО ЗСУВУ НА БАЗІ ДВОНАПІВПЕРІОДНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

Предметом вивчення в статті є осцилографічний метод вимірювання фазового зсуву двох гармонійних сигналів, після проведення їх двонапівперіодного перетворення та підсумування. *Метою* є розробка способів реалізації осцилографічного методу вимірювання фазового зсуву двох гармонійних сигналів, що дозволить суттєво знизити складову похибки вимірювання обумовлену фазовою не симетрією каналів передачі сигналів, за рахунок зменшення їх довжини. Проведення аналізу похибки вимірювань для кожного із способів визначення фазового зсуву двох гармонійних сигналів з застосуванням, їх двонапівперіодного перетворення. *Завдання:* постановка вимірювальної задачі визначення фазового зсуву двох гармонійних сигналів; аналіз відомих осцилографічних методів вимірювання фазового зсуву; розробка способів реалізації осцилографічного методу на підставі аналізу характеристик сумарного сигналу отриманого при проведенні двонапівперіодного перетворення; оцінка похибок вимірювання для кожного способу. Використовуваними *методами* є: методологія оцінки похибок вимірювання при проведенні опосередкованих вимірювань. Отримані такі *результати*. Запропоновані способи реалізації осцилографічного методу вимірювання з використанням сумарного сигналу після двонапівперіодного перетворення на підставі аналізу часових характеристик та локальних екстремумів даного сигналу. Визначено перелік вимірювальних операцій, що реалізує кожний спосіб. Проведено аналіз складових похибок вимірювання, та визначено ступень їх кореляції. Синтезовані співвідношення для розрахунку похибки вимірювання. *Висновки.* Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: розроблено осцилографічний метод, що дозволить суттєво знизити складову похибки обумовлену фазовою не симетрією каналів передачі сигналів; отримані співвідношення для реалізації осцилографічного методу вимірювання з використанням двонапівперіодного перетворення; отримано співвідношення для розрахунку середньоквадратичного відхилення сумарної похибки вимірювання кожним із запропонованих способів.

Ключові слова: осцилографічний метод; фазовий зсув; гармонійний сигнал; вимірювання; похибка; екстремум.

Вступ

На теперішній час широке застосування фазові методи вимірювання знаходять у радіолокації та радіонавігації, авіаційній та космічній техніках, геодезії, машинобудуванні, у системах неруйнівного контролю, з успіхом використовуються в експериментальній фізиці, радіофізиці, при проведенні прецизійних вимірювань у багатьох інших галузях [1, 2].

Фазові методи вимірювання та створенні на їх основі вимірювальні системи дозволяють вирішувати значне коло науково-технічних задач, яке пов'язане з високоточними вимірюваннями відстаней, часових інтервалів, кутів та аналізу характеристик сигнальних полів різноманітної фізичної природи (електромагнітних, оптичних, акустичних) [3, 4, 7, 8, 9].

Як показано в [5, 6] осцилограф – один з найпоширеніших вимірювальних приладів, що використовується в усіх галузях науки і техніки. Це пояснюється тим, що візуальне спостереження процесів на екрані дає досліднику велику кількість інформації. Останні десятиріччя стали стадією інтенсивного розвитку осцилографів. З приладів для спостереження і якісного дослідження процесів вони перетворилися на засоби вимірювання з високими метрологічними характеристиками. На підприємствах створено нові типи осцилографів із істотно розширеними функціональними й експлуатаційними можливостями. У конструюванні нових осцилографів переважає тенденція мініатюризації, використання мікропроцесорів, розширення номенклатури.

Осцилографи відрізняються за призначенням, принципом дії, характером досліджуваних сигналів, характеристиками точності, конструкцією, умовами експлуатації.

Осцилографи загального призначення використовують для осцилографування і вимірювання параметрів різноманітних сигналів у широкому діапазоні амплітуд, частот і тривалостей. Більшість з них розраховані на роботу як у нормальних умовах, так і за значного відхилення від них.

Багатоканальні осцилографи дають змогу на екрані одержувати зображення двох і більше сигналів, які подаються на відповідні канали. Це забезпечується комутацією каналів або використанням спеціальних пристроїв візуалізації.

Запам'ятовуючі осцилографи дають змогу зберегти (запам'ятовувати) на певний час досліджувані сигнал для подальшого відтворення. В цих осцилографах використовують запам'ятовуючі електронно-променеві трубки або цифрові пристрої запам'ятовування і обробки інформації.

Аналіз літератури

Розглянемо задачу виміру фазового зсуву двох гармонійних сигналів, яка наведена в [1].

Припустимо, існує два гармонійних сигнали $u_1(t)$ та $u_2(t)$, які мають фазовий зсув один відносно другого, який дорівнює $\Delta\varphi$ та належить інтервалу від 0 до 2π .

Виходячи з того, що вимірювання фазового зсуву відносяться до відносних вимірювань, тоді можливо записати зміну сигналів $u_1(t)$ та $u_2(t)$, у вигляді:

$$u_1(t) = U_{m1} \cos(2\pi ft),$$

$$u_2(t) = U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi),$$

де U_{m1} , U_{m2} - амплітуда сигналів $u_1(t)$ та $u_2(t)$ відповідно;

$f = \frac{1}{T}$ - частота сигналів; T - період зміни сигналів.

При використанні осцилографічних методів, як показано в [5, 6] значення вимірюваного фазового зсуву визначається за характером і формою осцилограм, причому. Суттєву роль на точність вимірювання відіграють амплітудна і особливо фазова симетрії каналів передачі сигналів вертикального та горизонтально відхилення, якість фокусування осцилографічної картини, нелінійні спотворення підсилювачів вимірювальних каналів та генераторів розгортки.

Вимірювання фазового зсуву осцилографічним методом проводиться з використанням лінійної або синусоїдальної розгортки.

Виміряти фазовий зсув двох гармонійних сигналів застосовуючи лінійну розгортку можливо, використовуючи багатоканальний осцилограф.

Цим методом можна скористатись у діапазоні частот, який відповідає смузі пропускання каналу вертикального відхилення Y. Сигнал $u_1(t)$ подається на вхід каналу 1, а сигнал $u_2(t)$ - на вхід каналу 2.

Генератор розгортки переводиться в автоматичний режим з внутрішньою синхронізацією. Для під'єднання сигналів до відповідних входів осцилографа використовують кабелі з близьким часом затримки. Вимірюється різниця по горизонталі між відповідними точками сигналу в поділках шкали (рис. 1).

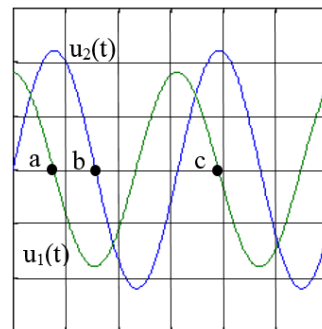


Рис. 1. Вимірювання фазового зсуву з застосуванням лінійної розгортки

Фазовий зсув визначають за формулою:

$$\Delta\varphi = \frac{|a-b|}{|a-c|} \cdot 2\pi.$$

Для вимірювання фази при використанні синусоїдальної розгортки одна з вимірюваних напруг подається на канал горизонтально відхилення, наприклад $u_1(t)$, а другий сигнал $u_2(t)$ - на канал вертикального відхилення.

Під дією цих напруг промінь на екрані описує інтерференційну фігуру - еліпс, вісі якого повернені на деякий кут відносно горизонтальної і вертикальної осей екрану (рис. 2).

Зсув фаз в цьому випадку може бути визначений двома способами.

За першим способом значення фазового зсуву $\Delta\varphi$ визначається за виразом

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{A}{B}\right).$$

Величини А та В показані на рис. 2. метод декілька незручний через неточність визначення центру еліпса О, проте ця формула не залежить від відношення напруг U_{m1} і U_{m2} .

За другим способом (рис. 2) значення фазового зсуву $\Delta\varphi$ визначається за виразом:

$$\Delta\varphi = 2\arctg\left(\frac{a}{b}\right),$$

де а, b – мала та велика вісі еліпса відповідно.

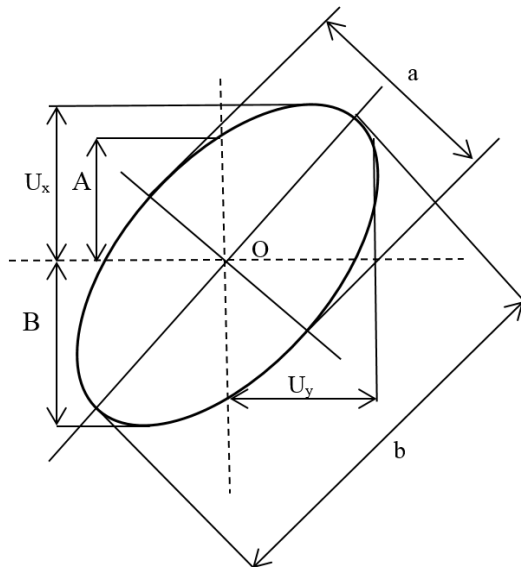


Рис. 2. Фігура Лісажу при синусоїдній розгортці осцилографа

Вище наведене співвідношення справедливе за умови $U_Y = U_X$. Вказана умова досягається шляхом регулювання вхідних атенуаторів каналів вертикального та горизонтального відхилень.

Аналіз метрологічних характеристик осцилографів показує, що значення фазового зсуву визначається з похибкою на рівні 3...6 кутових градусів. В [1, 2, 5, 6], показано, що найбільшою складовою похибки є складова, яка обумовлена фазовою не симетрією каналів передачі сигналів.

Мета статті. Запропонувати способи реалізації осцилографічного методу вимірювання фазового зсуву двох гармонічних сигналів, що дозволить суттєво знизити складову похибки вимірювання обумовлену фазовою не симетрією каналів передачі сигналів, за рахунок зменшення їх довжини. Провести аналіз похибки вимірювань для кожного із способів визначення фазового зсуву двох гармонічних сигналів з застосуванням, їх двонапівперіодного перетворення.

Основна частина

Осцилографічний метод вимірювання фазового зсуву двох гармонічних сигналів з використанням двонапівперіодного перетворення пропонується проводити в наступній послідовності.

Сигнали $u_1(t)$ та $u_2(t)$ надходять на двонапівперіодні перетворювачі. На виходах перетворювачів отримуємо сигнали:

$$u'_1(t) = |u_1(t)| = |U_{m1} \cos(2\pi ft)|,$$

$$u'_2(t) = |u_2(t)| = |U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi)|.$$

Сигнали $u'_1(t)$ та $u'_2(t)$ подаються на підсумуючий пристрій, та отримується сигнал $u'_\Sigma(t)$. Сигнал $u'_\Sigma(t)$ надходить на вхід каналу вертикального відхилення осцилографа.

Генератор розгортки переводиться в автоматичний режим з внутрішньою синхронізацією.

На екрані осцилографа отримуємо часову діаграму, яка наведена на рис. 3.

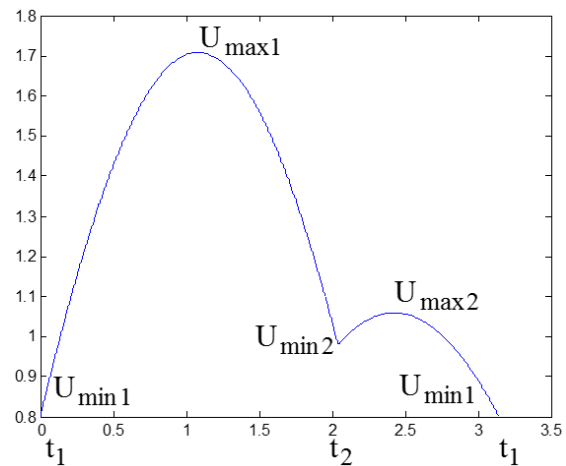


Рис. 3. Часова діаграма сигналу

Як наведено в [10], $u'_\Sigma(t)$ являє собою періодичний сигнал с періодом $T' = \frac{1}{2f}$.

При цьому сигнал $u'_\Sigma(t)$ має два локальних мінімуми U_{1min} та U_{2min} , які відповідають моментам часу $t_1 + nT'$, та $t_2 + nT'$ відповідно, де n може приймати будь яке ціле число від 0 до нескінченності, а також два локальні максимуми U_{1max} , U_{2max} .

Як показано в [9, 10], при різних значеннях фазового зсуву $\Delta\varphi$ змінюються, значення як часових характеристик сигналу $u'_\Sigma(t)$ (інтервали часу між локальними мінімумами $U_{1\min}$ і $U_{2\min}$), так і значення величин $U_{1\min}$, $U_{2\min}$ та $U_{1\max}$, $U_{2\max}$.

Виходячи з вище наведеного, можливо запропонувати дві групи способів вимірювання значення фазового зсуву $\Delta\varphi$ з використанням осцилографічного методу. Перша група способів ґрунтується на аналізі часових характеристик сигналу $u'_\Sigma(t)$, друга на аналізі значень локальних екстремумів даного сигналу.

Розглянемо можливість визначення значення фазового зсуву $\Delta\varphi$ по вимірним значенням часових інтервалів $\Delta t_{2,1} = t_2 - t_1$ та $\Delta t_{1,2} = t_1 - t_2$.

В залежності від значення фазового зсуву $\Delta\varphi$ між двома гармонічних сигналами часовий інтервал $\Delta t_{2,1}$ визначається наступним співвідношенням [10]:

$$\Delta t_{2,1} = \frac{1}{2f} - \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}.$$

Тоді, виходячи з вище зазначеного, значення фазового зсуву $\Delta\varphi$, за відомим значенням часового інтервалу $\Delta t_{2,1}$ і періоду сигналу T' визначається як:

$$\Delta\varphi = \pi - \pi \frac{\Delta t_{2,1}}{T'}. \quad (1)$$

Проведемо синтез співвідношень для визначення похибки вимірювання фазового зсуву $\Delta_{\Delta\varphi}$.

Для цього припустимо, що вимірне значення часового інтервалу $\Delta t_{2,1}$ і періоду T' відрізняються від істинних значень $\Delta t_{2,1}^*$, T'^* на малі величини, тоді маємо:

$$\begin{aligned} \Delta_{\Delta t_{2,1}} &= \Delta t_{2,1} - \Delta t_{2,1}^*, \\ \Delta_{T'} &= T' - T'^*. \end{aligned} \quad (2)$$

З урахуванням (1) та (2), запишемо:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi(\Delta t_{2,1}^* + \Delta_{\Delta t_{2,1}}; T'^* + \Delta_{T'}). \quad (3)$$

Розклавши праву частину формули (3) в ряд Тейлора для функції багатьох змінних, отримуємо з

точністю до малих першого порядку щодо величин $\Delta_{\Delta t_{2,1}}$, $\Delta_{T'}$

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi(\Delta t_{2,1}^*, T'^*) + \frac{\partial\Delta\varphi}{\partial\Delta t_{2,1}} \Delta_{\Delta t_{2,1}} + \frac{\partial\Delta\varphi}{\partial T'} \Delta_{T'}. \quad (4)$$

Частинні похідні функцій (1) за змінними $\Delta t_{2,1}$ та T' мають вигляд:

$$\frac{\partial\Delta\varphi}{\partial\Delta t_{2,1}} = -\frac{\pi}{T'}, \quad \frac{\partial\Delta\varphi}{\partial T'} = \frac{\pi \cdot \Delta t_{2,1}}{T'^2}.$$

При аналізі систем вимірювання [11], похибка розглядається як випадкова величина. Тоді, з урахуванням рекомендацій з підсумовування випадкових величин, в якості інтервального показника похибки, необхідно використовувати середньоквадратичне відхилення (СКВ).

Розрахунок значення СКВ похибки $\sigma_{\Delta\varphi}$ за відомими значеннями $\Delta t_{2,1}$ і T' проводиться з використанням правил підсумовування похибок результатів опосередкованих вимірювань [11].

Виходячи з того, що вимірювання значень часового інтервалу $\Delta t_{2,1}$ та періоду T' проведено з використанням каналу вертикального відхилення осцилографа, тоді справедливе наступне припущення: похибки вимірювання часового інтервалу $\Delta t_{2,1}$ і періоду T' є випадковими величинами що мають коефіцієнт кореляції близький до одиниці.

Тоді $\sigma_{\Delta\varphi}$ розраховується з використанням наступного співвідношення:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{\pi \cdot \Delta t_{2,1}}{T'^2} \sigma_{T'} - \frac{\pi}{T'} \sigma_{\Delta t_{2,1}},$$

де $\sigma_{\Delta t_{2,1}}$, $\sigma_{T'}$ – СКВ похибки вимірювання значень часового інтервалу $\Delta t_{2,1}$ та періоду T' відповідно.

В залежності від значення фазового зсуву $\Delta\varphi$ між двома гармонічних сигналами часовий інтервал $\Delta t_{1,2}$ визначається наступним співвідношенням [10]:

$$\Delta t_{1,2} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}.$$

Виходячи з вище наведеного виразу, значення фазового зсуву $\Delta\varphi$, за відомим значенням часового інтервалу $\Delta t_{1,2}$ і періоду сигналу T' визначається як:

$$\Delta\varphi = \pi \frac{\Delta t_{1,2}}{T'}$$

Розрахунок значення СКВ похибки $\sigma_{\Delta\varphi}$ за відомими значеннями $\Delta t_{1,2}$ і T' проводиться з використанням правил підсумовування похибок результатів опосередкованих вимірювань [11].

Виходячи з того, що вимірювання значень часового інтервалу $\Delta t_{1,2}$ та періоду T' проведено з використанням каналу вертикального відхилення осцилографа, справедливе наступне припущення: похибки вимірювання часового інтервалу $\Delta t_{1,2}$ і періоду T' є випадковими величинами що мають коефіцієнт кореляції близький до одиниці.

Тоді $\sigma_{\Delta\varphi}$ розраховується з використанням наступного співвідношення:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = k_{T'} \sigma_{T'} + k_{\Delta t_{1,2}} \sigma_{\Delta t_{1,2}},$$

де $\sigma_{\Delta t_{1,2}}$ – СКВ похибки вимірювання значення часового інтервалу $\Delta t_{1,2}$;

$$k_{\Delta t_{1,2}} = \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial \Delta t_{1,2}} = \frac{\pi}{T'} \text{ – ваговий коефіцієнт обумовлений похибкою вимірювання значення часового інтервалу } \Delta t_{1,2};$$

$$k_{T'} = \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial T'} = -\frac{\pi \cdot \Delta t_{1,2}}{T'^2} \text{ – ваговий коефіцієнт обумовлений похибкою вимірювання значення періоду } T'.$$

Розглянемо можливість визначення значення фазового зсуву $\Delta\varphi$ за вимірними значеннями величин локальних екстремумів.

Виходячи з [12], можливо запропонувати два способу визначення фазового зсуву $\Delta\varphi$ за відомими значеннями величин $U_{1\max}$, $U_{2\max}$ та $U_{1\min}$, $U_{2\min}$.

Перший спосіб. Вимірювання фазового зсуву $\Delta\varphi$ проводиться за відомими значеннями величин $U_{2\max}$ і $U_{1\min}$, $U_{2\min}$, з використанням наступного співвідношення [12]:

$$\Delta\varphi = \pi - \arcsin\left(\frac{U_{1\min}}{U_{2\max}}\right) - \arcsin\left(\frac{U_{2\min}}{U_{2\max}}\right).$$

Розрахунок значення СКВ похибки $\sigma_{\Delta\varphi}$ за відомими значеннями $U_{2\max}$, $U_{1\min}$ та $U_{2\min}$ проводиться з використанням правил підсумовування по-

хибок результатів опосередкованих вимірювань [11].

Виходячи з того, що вимірювання значень величин $U_{2\max}$, $U_{1\min}$ та $U_{2\min}$ проведено з використанням каналу вертикального відхилення осцилографа, тоді справедливо наступні припущення: похибки вимірювання $U_{2\max}$, $U_{1\min}$ та $U_{2\min}$ є випадковими величинами що мають коефіцієнтом кореляції близьким до одиниці.

Тоді $\sigma_{\Delta\varphi}$ визначається з використанням наступного співвідношення:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = k_{U_{2\max}} \sigma_{U_{2\max}} + k_{U_{1\min}} \sigma_{U_{1\min}} + k_{U_{2\min}} \sigma_{U_{2\min}},$$

де $\sigma_{U_{2\max}}$, $\sigma_{U_{1\min}}$, $\sigma_{U_{2\min}}$ – СКВ похибки вимірювання величин $U_{2\max}$, $U_{1\min}$ та $U_{2\min}$ відповідно;

$$k_{U_{2\max}} = \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial U_{2\max}} = \frac{U_{1\min}}{U_{2\max}^2 \sqrt{1 - \frac{U_{1\min}^2}{U_{2\max}^2}}} + \frac{U_{2\min}}{U_{2\max}^2 \sqrt{1 - \frac{U_{2\min}^2}{U_{2\max}^2}}} \text{ – ваговий коефіцієнт, обумовлений похибкою вимірювання значення величини } U_{2\max};$$

$$k_{U_{1\min}} = \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial U_{1\min}} = -\frac{1}{U_{2\max} \sqrt{1 - \frac{U_{1\min}^2}{U_{2\max}^2}}} \text{ – ваговий коефіцієнт, обумовлений похибкою вимірювання значення величини } U_{1\min};$$

$$k_{U_{2\min}} = \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial U_{2\min}} = -\frac{1}{U_{2\max} \sqrt{1 - \frac{U_{2\min}^2}{U_{2\max}^2}}} \text{ – ваговий коефіцієнт, обумовлений похибкою вимірювання значення величини } U_{2\min}.$$

Другий спосіб. Вимірювання фазового зсуву $\Delta\varphi$ проводиться за відомими значеннями величин $U_{1\max}$ і $U_{1\min}$, $U_{2\min}$. Співвідношення, яке визначає взаємозв'язок між вказаними величинами має вигляд [12]:

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{U_{1\min}}{U_{1\max}}\right) - \arcsin\left(\frac{U_{2\min}}{U_{1\max}}\right).$$

Розрахунок значення СКВ похибки $\sigma_{\Delta\varphi}$ за відомими значеннями $U_{1\max}$, $U_{1\min}$ та $U_{2\min}$ про-

водиться з використанням правил підсумовування похибок результатів опосередкованих вимірювань [11].

Виходячи з того, що вимірювання значень величин $U_{1\max}$, $U_{1\min}$ та $U_{2\min}$ проведено з використанням каналу вертикального відхилення осцилографа, тоді справедливо наступні припущення: похибки вимірювання $U_{1\max}$, $U_{1\min}$ та $U_{2\min}$ є випадковими величинами що мають коефіцієнт кореляції близький до одиниці.

Тоді $\sigma_{\Delta\varphi}$ визначається з використанням наступного співвідношення:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = k'_{U_{1\max}} \sigma_{U_{1\max}} + k'_{U_{1\min}} \sigma_{U_{1\min}} + k'_{U_{2\min}} \sigma_{U_{2\min}},$$

де $\sigma_{U_{1\max}}$ – СКВ похибки вимірювання величини $U_{1\max}$;

$$k'_{U_{1\max}} = \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial U_{1\max}} = - \frac{U_{1\min}}{U_{1\max}^2 \sqrt{1 - \frac{U_{1\min}^2}{U_{1\max}^2}}} - \frac{U_{2\min}}{U_{1\max}^2 \sqrt{1 - \frac{U_{2\min}^2}{U_{1\max}^2}}} - \text{ваговий коефіцієнт, обумовлений похибкою вимірювання значення величини } U_{1\max};$$

де $\sigma_{U_{1\min}}$ – СКВ похибки вимірювання величини $U_{1\min}$;

$$k'_{U_{1\min}} = \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial U_{1\min}} = \frac{1}{U_{1\max} \sqrt{1 - \frac{U_{1\min}^2}{U_{1\max}^2}}} - \text{ваговий коефіцієнт, обумовлений похибкою вимірювання значення величини } U_{1\min};$$

де $\sigma_{U_{2\min}}$ – СКВ похибки вимірювання величини $U_{2\min}$;

$$k'_{U_{2\min}} = \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial U_{2\min}} = \frac{1}{U_{1\max} \sqrt{1 - \frac{U_{2\min}^2}{U_{1\max}^2}}} - \text{ваговий коефіцієнт обумовлений похибкою вимірювання значення величини } U_{2\min}.$$

де $\sigma_{U_{2\min}}$ – СКВ похибки вимірювання величини $U_{2\min}$.

Висновки

Проведено аналіз відомих осцилографічних методів вимірювання фазових зсувів. Аналіз показав, що суттєвий вклад у підсумкову похибку вимірювання фазових зсувів вносить складова, яка обумовлена фазовою не симетрією каналів передачі сигналів. У якості альтернативного способу вимірювання, що реалізує осцилографічний метод, запропоновано використовувати сигнал, який отриманий в результаті сумування гармонічних сигналів після проведення їх двонапівперіодного перетворення.

На відміну від відомих осцилографічних методів, використання даного підходу дозволить суттєво знизити складову похибки обумовлену фазовою не симетрією каналів передачі сигналів, за рахунок зменшення довжини каналів перетворення та передачі вимірювальної інформації.

Запропоновані способи реалізації процесу вимірювання. Визначені співвідношення для розрахунку похибки вимірювання. Данні результати в подальшому доцільно використати в процесі розробки методики реалізації вимірювання фазового зсуву осцилографічним методом, побудованого на базі аналізу характеристик сигналу $u_{\Sigma}^{\prime}(t)$.

Література

1. Куц, Ю. В. Статистична фазометрія [Текст] / Ю. В. Куц, Л. М. Щербак. – Тернопіль : Тернопільський державний технічний університет, 2009. – 384 с.
2. Вимірювання різниці фаз у радіоелектроніці [Текст] / Н. Т. Бова, В. А. Гайжесевський, С. М. Маєвський, В. В. Малєбнік. – К. : Вища школа, 1972. – 231 с.
3. Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний [Текст] / С. М. Маевский, В. Г. Баженов, Е. К. Батуревич, Ю. В. Куц. – К. : Вища шк., 1983. – 83 с.
4. Застрогин, Ю. Ф. Прецизионные измерения параметров движения с использованием лазера [Текст] / Ю. Ф. Застрогин. – М. : Машиностроение, 1986. – 272 с.
5. Осцилографи та методи вимірювання радіотехнічних величин [Текст]: навч. посібник / Ю. Я. Бобало, Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселічник, О. В. Надобко. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 88 с.
6. Метрологія у галузі зв'язку. Книга 1. Загальні електрорадіовимірювання [Текст] : посібник / Л. В. Коломієць, П. П. Воробієнко, М. Т. Козаченко, М. Б. Налісний, Л. О. Козаченко, О. В. Грабовський. – Одеса : ТОВ «ВМВ», 2009. – 480 с.
7. Sudarshan, V. Error detection and correction in semiconductor memories using 3D parity check code with hamming code [Text] / V. Sudarshan, M. Vinodhini, N. S. Murty // International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). – 2017. – P. 0974-0978.
8. Using of parametric transducers in pulsed eddy current testing [Text] / Y. Kuts, S. Maievskiy, A. Protasov, I. Lysenko, O. Dugin // II науково-технічна конференція "НК в контексті асоційованого членства України в ЄС" 15-19 жовтня 2018 року, м. Люблін, Польща. – 2018. – P. 30-33.
9. Study of Parametric Transducer Operation in Pulsed Eddy Current Non Destructive Testing [Text] / Y. Kuts, S. Maievskiy, A. Protasov, I. Lysenko, O. Dugin // 2018 IEEE 38th International Conference on Elec-

tronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2018. – P. 594-597.

10. Тышко, С. А. Анализ возможности использования двухполупериодного преобразования для измерения фазового сдвига гармонических сигналов с равной амплитудой [Текст] / С. А. Тышко, В. Г. Смоляр, О. Е. Забула // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Х. Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2013. – №2 (30). – С. 42 - 44.

11. Тойберт, П. Оценка точности результатов измерений [Текст] : пер. с нем. / П. Тойберт. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 88 с.

12. Тышко, С. А. Определение фазового сдвига двух гармонических сигналов по суммарной функции двухполупериодного преобразования [Текст] / С. А. Тышко, В. Г. Смоляр, О. Е. Забула // Технолозія приборостроєння. – 2018. – № 1. – С. 19-24.

References

1. Kuts, Yu. V., Shcherbak, L. M. *Statystychna fazometriya* [Statistical phasometry]. Ternopil', Ternopil's'kyu derzhavnyu tekhnichnyu universytet Publ., 2009. 384 p.

2. Bova, N. T., Gajzhevs'kyu, V. A., Maievskiy, S. M., Malyebnik, V. V. *Vymiryuvannya riznytsi faz u radioelektronitsi* [Phase difference measurement in radio electronics]. Kiev, Vyshcha shkola Publ., 1972. 231 p.

3. Maievskiy, S. M., Bazhenov, V. G., Baturevych, E. K., Kuts, Yu. V. *Prymenenye metodov fazometry dlya prytsyzyonnoho yzmerenyya rasstoyanyu* [Application of phasometry methods for precision distance measurement]. Kiev, Vyshcha shk. Publ., 1983. 83 p.

4. Zastrogin, Yu. F. *Pretsizionnye izmereniya parametrov dvizheniya s ispol'zovaniem lazera* [Precision laser motion measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 272 p.

5. Bobalo, Ju. Ja., Nedostup, L. A., Kiselychnyk, M. D., Nadobko, O. V. *Ostsylohrafy ta metody vymiryuvannya radiotekhnichnykh velychyn: Navch. Posibnik* [Oscilloscopes and Methods for Measuring Radio Engineering Values]. L'viv, Vydavnytstvo L'vivs'koyi politekhniki Publ., 2014. 88 p.

6. Kolomiyets', L. V., Vorobiyenko, P. P., Kozachenko, M. T., Nalisnyy, M. B., Kozachenko, L. O., Hrabovs'kyu, O. V. *Metrolohiya u haluzi zv'yazku. Knyha 1. Zahal'ni elektroradiovymiryuvannya* [Communication metrology. Book 1. General Electro Radio Measurements]. Odesa, TOV «VMV» Publ., 2009. 480 p.

7. Sudarshan, V., Vinodhini, M., Murty, N. S. Error detection and correction in semiconductor memories using 3D parity check codewith hamming code. *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 2017, pp. 0974-0978.

8. Kuts, Y., Maievskiy, S., Protasov, A., Lysenko, I., Dugin, O. Using of parametric transducers in pulsed eddy current testing. *II naukovu-tekhnichna konferenciya "NK v konteksti asocijovanogo chlenstva Ukrayiny" v YeS* 15-19 zhovtnya 2018 roku, Lyublin, Pol'sha, 2018. pp. 30-33.

9. Lysenko, I., Kuts, Y., Maievskiy, S., Protasov, A., Dugin, O. Study of Parametric Transducer Operation in Pulsed Eddy Current NonDestructive Testing. *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2018, pp. 594-597.

10. Tyshko, S. A., Smoljar, V. G., Zabula, O. E. *Analiz mozhnosti ispol'zovaniya dvuh poluperiodnogo preobrazovaniya dlja izmereniya fazovogo sdviga garmonicheskikh signalov s ravnoj amplitudoj* [Analysis of the possibility of using two half-period transforms for measuring the phase shift of harmonic signals with equal amplitude]. Zbirnik naukovih prac' Harkivs'kogo universitetu Povitrjanih Sil, Kharkiv, Kharkivs'kij universitet Povitrjanih Sil imeni Ivana Kozheduba Publ., 2013, no. 2 (30), pp. 42-44.

11. Toibert, P. *Otsenka tochnosti rezul'tatov izmerenii* [Assessment of the accuracy of measurement results]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 88 p.

12. Tyshko, S. A., Smolyar, V. G., Zabula, O. E. *Opreделение fazovogo sdviga dvukh garmonicheskikh signalov po summarnoi funktsii dvukhpoluperiodnogo preobrazovaniya* [Determination of the phase shift of two harmonic signals by the total half-wave transformation function]. *Tekhnologiya priborostroєniya – Instrumentation Technology*, 2018, no. 1, pp. 19-24.

Поступила в редакцію 12.09.2019, рассмотрена на редколлегии 10.12.2019

ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА НА БАЗЕ ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

С. В. Губин, С. А. Тышко, О. Е. Забула, Ю. Н. Черниченко

Предметом изучения в статье является осциллографический метод измерения фазового сдвига двух гармонических сигналов, после проведения их двухполупериодного преобразования и суммирования. **Целью** является разработка способов реализации осциллографического метода измерения фазового сдвига двух гармонических сигналов, позволяющих существенно снизить составляющую погрешности измерения, обусловленную фазовой не симметрией каналов передачи сигналов, за счет уменьшения их длины. Проведение анализа погрешности измерений для каждого из способов определения фазового сдвига двух гармонических сигналов с применением их двухполупериодного преобразования. **Задачи:** постановка измерений по определению фазового сдвига двух гармонических сигналов; анализ известных осциллографических методов измерения фазового сдвига, разработка способов реализации осциллографического метода на основании анализа характеристик суммарного сигнала полученного при проведении двухполупериодного преобра-

зования; оценка погрешностей измерения для каждого способа. Используемыми **методами** являются: методы оценки погрешностей измерения при проведении косвенных измерений. Получены следующие **результаты**. Предложены способы реализации осциллографического метода измерения с использованием суммарного сигнала после двухполупериодного преобразования на основании анализа временных характеристик и локальных экстремумов данного сигнала. Определен перечень измерительных операций, реализующих каждый способ. Проведен анализ составляющих погрешностей измерения, и определена степень корреляции. Синтезированы соотношения для расчета погрешности измерения. **Выводы**. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: разработан осциллографический метод, позволяющий существенно снизить составляющую погрешности, обусловленную фазовой не симметрией каналов передачи сигналов; получены соотношения для реализации осциллографического метода измерения с использованием двухполупериодного преобразования; получены соотношения для расчета среднеквадратичного отклонения суммарной погрешности измерения каждым из предложенных способов.

Ключевые слова: осциллографический метод; фазовый сдвиг; гармонический сигнал; измерения; погрешность; экстремум.

OSCILLOGRAPHIC METHOD OF MEASUREMENT OF PHASE SHIFT ON THE BASIS OF TWO- SEMIPERIOD CONVERSION

S. Gubin, S. Tyshko, O. Zabula, U. Chernichenko

The **subject matter** of the article is the oscilloscope methods of measuring the phase shift of two harmonic signals, after carrying out their two-half-period transformation and summing. The **goal** is to develop ways to implement an oscilloscope method of measuring the phase shift of two harmonic signals, which will significantly reduce the component of measurement error caused by phase non-symmetry of the transmission channels, by reducing their length. Analyze the measurement error for each of the methods for determining the phase shift of two harmonic signals using their two-half-periodic transformation. The **tasks**: statement of measurement problem of determination of phase shift of two harmonic signals; analysis of known oscilloscope methods of phase shift measurement, development of methods for implementing the oscilloscope method based on the analysis of the characteristics of the total signal obtained during the two-half-period transformation; estimation of measurement errors for each method. The **methods** used are the methodology for estimating measurement errors in indirect measurements. The following **results** were obtained. Methods for implementing an oscilloscope measurement method using the total signal after a two-half-period transformation based on the analysis of temporal characteristics and local extrema of this signal are proposed. The list of measuring operations that implement each method is defined. The analysis of the components of measurement errors was performed and the degree of correlation was determined. Synthesized ratios for the calculation of measurement error. **Conclusions**. The scientific novelty of the obtained results is the following: an oscilloscopic method has been developed that will allow reducing substantially the component of the error caused by phase non-symmetry of the signal transmission channels; obtained ratios for the implementation of the oscilloscope measurement method using two-half-period conversion; obtained ratios to calculate the standard deviation of the total measurement error in each of the proposed methods.

Keywords: oscilloscope method; phase shift; harmonic signal; measurement; error; extreme.

Губін Сергій Вікторович – канд. техн. наук, професор, декан факультету ракетно-космічної техніки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Тишко Сергій Олександрович – канд. техн. наук, доцент, інженер групи, Харківське ПГЗ-ДКАУ, Харків, Україна.

Забула Олег Євгенович – канд. військ. наук, доцент, доцент кафедри, Національна академія НГ України, Харків, Україна.

Черниченко Юрій Миколайович – доцент, доцент кафедри, Національна академія НГ України, Харків, Україна.

Gubin Sergiy – PhD in Technical Science, Professor, Dean of the Faculty of Rocket and Space Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.gubin@khai.edu.

Tyshko Sergiy – PhD in Technical Science, Associate Professor, Engineer of the Group, Kharkiv PGZ-DKAU, Kharkiv, Ukraine, e-mail: sergeytyshko57@gmail.com.

Zabula Oleg – PhD in Military Science, Associate Professor, Associate Professor, Department of National Academy NG of Ukraine, Kharkiv, Ukraine.

Chernichenko Yuriy – Associate Professor, Associate Professor, Department of National Academy NG of Ukraine, Kharkiv, Ukraine.