

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 620.179.14

## МЕТОД УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ФАЗОВОЇ ДВОКООРДИНАТНОЇ РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

<sup>1)</sup>Малько В. П., <sup>1)</sup>Куц Ю. В., <sup>1)</sup>Лисенко Ю. Ю., <sup>2)</sup>Щербак Л. М.<sup>1)</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>2)</sup>Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, УкраїнаE-mail: [vovaviking03@gmail.com](mailto:vovaviking03@gmail.com), [y.kuts@ukr.net](mailto:y.kuts@ukr.net), [j.lysenko@kpi.ua](mailto:j.lysenko@kpi.ua), [prof\\_scherbak@ukr.net](mailto:prof_scherbak@ukr.net)

Стаття присвячена питанню удосконалення координатної реєстрації інформації в засобах автоматизованого неруйнівного контролю. Існуючі системи безконтактної реєстрації просторового положення датчиків неруйнівного контролю здебільшого орієнтовані на використання сигнальних полів різної фізичної природи, до прикладу акустичного чи оптичного, які створюються в околі положення цих датчиків, та амплітудних методів оброблення сигналів. Останні не забезпечують необхідної точності визначення координат у разі використання малоапертурних датчиків неруйнівного контролю.

В основу запропонованого технічного рішення покладено метод трилатерації. Визначення відстаней між випромінювачем, який конструктивно поєднаний з датчиком, та двома приймачами ультразвукових коливань здійснюється фазовим методом. Цей метод забезпечує підвищену точність визначення координат датчика. Усунення багатозначності фазових вимірювань ґрунтується на поєднанні багаточастотного методу та числової системи залишкових класів. Це дає змогу мінімізувати вірогідність некоректного розв'язання неоднозначності результатів фазових вимірювань відстані та забезпечити високу точність визначення координат (з абсолютною похибкою порядку  $\pm 0,5$  мм). Наведено ідею методу та основні розрахункові формули, які надають змогу визначити модулі числової системи залишкових класів та значення робочих частот ультразвукових коливань. Узгодження дискретів визначення фазових зсувів сигналів з модулями числової системи залишкових класів на різних робочих частотах дає змогу звести розв'язання неоднозначності результатів фазових вимірювань до задачі відновлення цілих чисел в позиційній системі числення з їх представленням залишками в числовій системі залишкових класів. Розглянуто механізм виникнення грубих похибок відновлення цілих чисел. Запропоновано алгоритм усунення цієї похибки. В цілому коректність алгоритму визначення координат датчика підтверджена результатами комп'ютерного моделювання. Розглянутий метод двокоординатної реєстрації інформації може бути використаний як при розробці нових автоматизованих засобів неруйнівного контролю, так і для вдосконалення існуючих, які передбачають ручний метод сканування поверхні об'єктів контролю.

**Ключові слова:** визначення координат датчика; фазовий метод; система залишкових класів; автоматизовані системи неруйнівного контролю.

**Вступ**

Підвищення вимог до якості продукції, вірогідності результатів контролю технічного стану об'єктів висуває питання автоматизації контролю в ряд першочергових питань неруйнівного контролю (НК). Автоматизація технологій НК відбувається за двома напрямками [1]. Перший полягає у прийнятті діагностичних рішень без участі людини-оператора та зменшенні в такий спосіб суб'єктивної помилки контролю. Другий напрям передбачає отримання діагностичної інформації з певних точок поверхні об'єкта контролю (ОК) в сукупності з їх координатами. Це дає змогу формувати В-стани та С-скани контрольованих ділянок ОК, відстежувати динаміку

розвитку дефектів у випадку, коли їх розміри ще не перевищили бракувального рівня, досліджувати проблемні ділянки виробів іншими засобами НК з метою підвищення надійності результатів контролю.

В загальному випадку автоматизовані системи НК передбачають отримання вихідних електричних сигналів датчиків як функцій виду  $u(t, \bar{p}, \bar{r})$  декількох аргументів – часу  $t$ , вектору контрольованих параметрів  $\bar{p}$  та вектору координат  $\bar{r}$  в прийнятій системі координат, в якій розглядається ОК чи його частина.

Отримання координат датчика передбачає використання додаткової підсистеми визначення

просторового положення датчика у процесі сканування ним поверхні ОК. Наразі існує значна кількість варіантів реалізації автоматизованих безконтактних систем реєстрації координат просторового положення датчиків НК [1, 2, 3]. В роботі [2] проаналізовано використання систем інерційної навігації для задач визначення координат. Недоліком цього методу є висока похибка визначення переміщення внаслідок використання операцій подвійного інтегрування прискорення. Ця похибка збільшується зі збільшенням часу сканування. Відзначено, що за 10 хвилин роботи такої інерційної системи може накопичитися похибка визначення переміщення до  $\sim 0,5$  м. Такий результат є неприйнятним для використання в системах НК.

Найчастіше визначення координат датчиків дефектоскопів здійснюється методами вимірювання лінійних та кутових величин. У роботі [4] розглянуто механічний координатограф фірми «Panametrics» із лінійними вимірювачами відстані для використання в контролі товщини сталевих листів та ступеня пошкодження корпусу суден за допомогою ультразвукового товщиноміру. До його складу входить система вимірювачів довжини типу рулетки із електронними зчитувачами міток. Похибка визначення координат за цим методом знаходиться в інтервалі  $\pm 17,5$  мм.

В роботі [5] наведено автоматизовану механічну систему позиціонування перетворювачів для ультразвукового контролю лопаті вітрогенераторів без їх демонтажу. Система являє собою алюмінієву раму, яка кріпиться до лопаті на вакуумованих присосках у вертикальному положенні. Перетворювач переміщується в межах цієї рамки по напрямним за допомогою крокових двигунів, які і визначають координати перетворювача. Контактний спосіб визначення координат певним чином обмежує його використання.

В [3] наведено безконтактну триангуляційну оптико-механічну систему визначення двомірних координат. У цій системі два циліндричних обертових екрана з прорізами у вигляді щілин перетворюють плоскі кути на часові інтервали між двома імпульсами від фотодіодів, що опромінюються джерелами світла. Наявність обертових елементів ускладнює конструкцію сканера. Точність визначення координат становить декілька сантиметрів.

В роботах [1, 6] наведено ультразвукову безконтактну систему координатної реєстрації положення датчиків НК на основі методу трилатерації. В цій системі датчик НК суміщений з ультразвуковим ненаправленим збудником ультразвукових коливань, що поширюються в навколишньому середовищі до двох рознесених на певну відстань ультразвукових перетворювачів. Часова затримка ультразвукових коливань вимірюється амплітудним методом за обвідними сигналу. За високого відношення сигнал/шум такий спосіб дає можливість отримати похибку позиціонування датчику

порядку  $1 \dots 2$  см. Така похибка може бути прийнятною для ультразвукового НК з датчиками значних розмірів, але завелика у випадку використання малоапертурних ультразвукових сенсорів, до прикладу на основі магнітострикційного ефекту [7], або вихрострумівих перетворювачів, що використовуються у вихрострумовій дефектоскопії [8].

Відомо, що фазовий метод вимірювання відстаней забезпечує вищу точність, але у випадку його застосування необхідно розв'язувати задачу неоднозначності фазових вимірювань. До прикладу, довжина ультразвукової хвилі частотою 33 кГц у повітрі має становити  $\sim 0,01$  м, тому на дистанції 1 м фаза коливання зміниться на  $200\pi$  рад.

Відомо низку способів усунення багатозначності фазових вимірювань, які передбачають виконання вимірювань на декількох частотах і використовуються, до прикладу, в радіонавігаційних системах [9] чи оптичних вимірювачах відстані [10]. Серед відомих способів заслуговує на увагу спосіб усунення багатозначності фазових вимірювань, що ґрунтується на алгебрі числової системи залишкових класів [11], який має низку унікальних властивостей для застосування в ультразвуковій фазовій далекометрії.

Метою статті є розроблення методу ультразвукової фазової двокоординатної реєстрації інформації з усуненням багатозначності фазових вимірювань на основі числової системи залишкових класів.

### Постановка задачі

Необхідно визначити двовимірні Декартові координати датчика ВСНК на контрольованій плоскій ділянці ОК розміром  $L \times L$ . Визначення координат відбувається за методом трилатерації. Вимірювання відстаней виконується через визначення затримок ультразвукових коливань частотою не менше 25 кГц, що поширюються від випромінювача. Останні збуджуються у повітряному просторі перетворювачем, встановленим на корпусі датчика НК і сприймаються двома приймачами, розташувannya яких на ОК задає декатрону систему координат. Затримка коливань визначається багаточастотним фазовим методом з усуненням багатозначності фазових даних на основі числової системи залишкових класів (ЧСЗК).

Необхідно виконати моделювання процесу відновлення кумулятивної фази сигналів на основі ЧСЗК та визначення координат датчика, а також оцінити похибки визначення координат датчика в межах контрольованої ділянки ОК.

### Теоретичний базис методу двокоординатної реєстрації інформації

Теоретичний базис включає наступні складові:

1. Метод трилатерації, як основа для визначення координат датчика НК.

2. Фазовий багаточастотний метод вимірювання відстаней.
3. Числова система залишкових класів (використовується для усунення багатозначності фазових вимірювань).

Нижче ці складові розглянуті в обсязі, достатньому для розуміння процесу визначення координат датчиків в автоматизованих системах НК.

**Метод трилатерації.** Цей метод полягає у визначенні координат точки за трьома сторонами трикутника. Якщо відомі сторони  $a, b, c$  трикутника  $ABC$ , а база – сторона  $BC$ , пов'язана з декартовою системою координат  $xOy$  (рис. 1), то координати т.  $A(x_A, y_A)$  в межах контрольованої ділянки ОК, заданої квадратом  $BCDE$ , згідно з теоремою Піфагора визначаються як

$$x_A = \sqrt{c^2 - \left(\frac{c^2 + b^2 - a^2}{2b}\right)^2}, \quad y_A = \frac{c^2 + b^2 - a^2}{2b}.$$

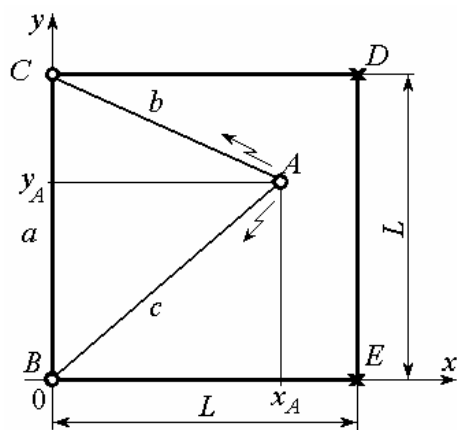


Рис. 1. Геометрична модель визначення координат датчика за методом трилатерації

База системи – сторона  $BC$ , тобто величина  $a$ , відома з високою точністю, а т.  $A$  визначає координати положення датчика НК на контрольованій ділянці ОК. Сторони  $AB$  та  $AC$  підлягають вимірюванню одним з відомих способів.

**Фазовий багаточастотний метод вимірювання відстаней.** Цей метод, стосовно розв'язуваної задачі координатної реєстрації інформації в автоматизованій системі НК реалізується наступним чином. Ненаправлений випромінювач ультразвукових коливань синусної форми, суміщений конструктивно з датчиком НК (його положенню на рис. 1 відповідає т.  $A$ ), формує ультразвукові коливання, які приймаються двома приймачами, рознесеними на відстань певної бази  $a = L$  (їх положенню на рис. 1 відповідають т.  $B$  і т.  $C$ ). Моделі прийнятого та випроміненого коливань на  $i$ -тій робочій частоті за відстані  $D$  між ними представляються формулами

$$u_{i,1}(t, D) = U_{i,1} \cos(2\pi f_i t - 2\pi D/\lambda_i),$$

$$t \in T_b, \quad D = \{b, c\}, \quad i = \overline{1, k},$$

$$u_{i,2}(t) = U_{i,2} \cos(2\pi f_i t), \quad t \in T_b, \quad i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

де  $U_1, U_2$  – амплітуди сигналів,  $f_i$  – значення  $i$ -тої частоти,  $t$  – поточний час,  $T_b$  – час випромінювання сигналів,  $\lambda_i$  довжиною хвилі  $i$ -тої частоти,  $k$  – кількість робочих частот. Тривалість інтервалу  $T_b$  обирають незначною з метою мінімізації впливу на результат можливих відбиттів ультразвукових коливань від сторонніх предметів в околі зони контролю, які можуть спотворити сигнал, що розповсюджується між випромінювачем і приймачем вздовж прямої. До прикладу, якщо сигнал  $u_{i,1}(t, D)$  містить 5 періодів ультразвукових коливань частотою 25 кГц, маємо  $T_b = 0,2$  мс. Це надає змогу уникнути впливу всіх можливих сигналів відбиттів, для яких довжина акустичного каналу у повітрі збільшується всього на величину  $330 \text{ м/с} \cdot 0,2 \text{ мс} = 6,6 \text{ см}$  (тут швидкість ультразвукових хвиль у повітрі прийнята рівною  $v = 330 \text{ м/с}$ ).

З огляду на використання в апаратурі координатної реєстрації інформації цифрових методів опрацювання даних, представимо дискретну модель вимірювальних сигналів вкладеними в сигнали (1) відповідними дискретними послідовностями

$$u_{i,1}[j, D] = U_{i,1} \cos(2\pi f_i j T_d - 2\pi D/\lambda_i),$$

$$t \in T_b, \quad D = \{b, c\}, \quad i = \overline{1, k}, \quad j = \overline{1, J},$$

$$u_{i,2}[j] = U_{i,2} \cos(2\pi f_i j T_d),$$

$$t \in T_b, \quad i = \overline{1, k}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

де  $T_d$  період дискретизації сигналів  $T_d \ll f_i^{-1}$ .

Застосування до послідовностей (2) дискретного перетворення Гільберта сигналів [12, 13], дає змогу на кожній робочій частоті визначити різницю дискретних фаз сигналів (2) [12, 13] в межах інтервалу  $[0, 2\pi)$  виду

$$\Phi_i^b[j] = \Phi_i^b[j](\text{mod } 2\pi) = 2\pi \frac{b}{\lambda_i}(\text{mod } 2\pi),$$

$$i = \overline{1, k}, \quad j = \overline{1, J} \quad (3)$$

$$\Phi_i^c[j] = \Phi_i^c[j](\text{mod } 2\pi) = 2\pi \frac{c}{\lambda_i}(\text{mod } 2\pi),$$

$$i = \overline{1, k}, \quad j = \overline{1, J}$$

де  $\Phi_i^b[j], \Phi_i^c[j]$  – повні (кумулятивні, значно більші за  $2\pi$ ) фазові зсуви сигналів, отримані при їх поширенні вздовж дистанцій  $b$  і  $c$  на  $i$ -тій частоті.

Оскільки сигнали  $u_{i,1}[j, D]$ , відповідно і значення  $\Phi_i^b[j], \Phi_i^c[j]$  в реальних експериментах неминуче спотворюються дією шумів і завад різної фізичної природи, доцільно в алгоритмі відновлення повної фази використовувати, за аналогією до методів статистичного опрацювання кутових даних на площині [11], усереднені на колі значення різ-

ниць дискретних фаз сигналів:  
 $\bar{\varphi}_i^b = \text{CMD}(\varphi_i^b [j]), \quad \bar{\varphi}_i^c = \text{CMD}(\varphi_i^c [j]),$  де  
 $\text{CMD}(\cdot)$  – оператор усереднення на колі фазових даних (скорочення від **C**ircular **M**ean **D**irection). Цей оператор (на прикладі усереднення послідовності  $\{\varphi_i^b [j], j = \overline{1, J}\}$ ) дається наступними формулами

$$\bar{\varphi}_i^b = \text{CMD}(\varphi_i^b [j]) = \arctg \frac{S_i^b}{C_i^b} + \frac{\pi}{2} \left\{ 2 - (\text{sign} S_i^b) \times \right. \\ \left. \times (1 + \text{sign} C_i^b) \right\}, \quad i = \overline{1, k}, \quad j = \overline{1, J},$$

$$C_i^b = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \cos \varphi_i^b [j], \quad S_i^b = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sin \varphi_i^b [j], \\ i = \overline{1, k}, \quad j = \overline{1, J}.$$

**Числова системи залишкових класів та особливості її використання для усунення багатозначності фазових вимірювань.** ЧСЗК ґрунтується на представленні цілого числа  $A$  множиною залишків від його ділення на систему менших взаємопростих чисел  $\{m_i, i = \overline{1, k}\}$  – модулів ЧСЗК. В [11] показано, що до такої задачі може бути зведена задача усунення багатозначності багаточастотних фазових вимірювань. Така можливість ґрунтується на властивості циклічності, що притаманна і представленню послідовності цілих чисел в ЧСЗК і фазовим зсувам сигналів. На рис. 2 подано графічну ілюстрацію ідеї використання ЧСЗК у багаточастотних фазових вимірюваннях.

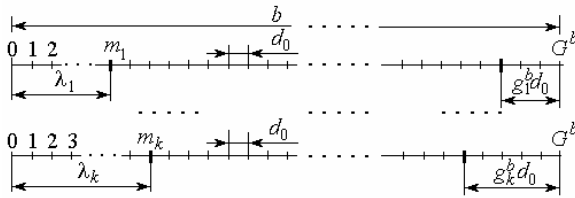


Рис. 2. Графічна ілюстрація отримання лишків ЧСЗК для фазового методу вимірювання відстані

Перетворювана відстань  $b$ , з точністю до дискрету вимірювання відстані  $d_0$ , визначається як  $b = G^b d_0$ . Для цілого  $G^b$  в ЧСЗК має місце представлення  $G^b = (g_1^b, g_2^b, \dots, g_k^b)$ . Для цього достатньо задати [11]:

- довжини ультразвукових хвиль  
 $\lambda_i = m_i d_0, \quad i = \overline{1, k};$
- частоти ультразвукових хвиль  
 $f_i = \frac{v}{m_i d_0}, \quad i = \overline{1, k}; \quad (4)$

- дискрети вимірювання фазових зсувів  $\varphi_i$  на  $i$ -тій робочій частоті  
 $\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{m_i}, \quad i = \overline{1, k}, \quad (5)$

- модулі ЧСЗК, що задовольняють умову відновлення з представлення залишками максимального числа  $G_{\max}$

$$G_{\max} < M = \prod_{i=1}^k m_i. \quad (6)$$

Виконання цих умов дає можливість обчислити залишки  $g_i$  через результати фазових вимірювань

$$g_i(b) = G^b \pmod{m_i} = \left[ \frac{\bar{\varphi}_i^b}{\Delta\varphi_i} \right]^+, \quad i = \overline{1, k},$$

де  $[ ]^+$  – оператор виділення цілої частини числа.

Відновлення цілого числа  $G^b$  в позиційній системі числення виконується за алгоритмом [15]

$$G^b = \sum_{i=1}^k g_i^b B_i \pmod{M}, \quad (7)$$

де  $(B_1, \dots, B_i, \dots, B_k)$  – система ортогональних базисів для обраної числової системи модулів.

**Моделювання процесу відновлення повної фази сигналу на основі ЧСЗК та визначення координат точок.** Моделювання проводилось для наступних вихідних даних: розмір контрольованої пласкої ділянки  $L \times L = 1\text{ м} \times 1\text{ м}$ ; дискрет вимірювання відстані  $d_0 = 1\text{ мм}$ ; довжина бази  $a = 1\text{ м}$ . Процес відновлення повної фази сигналів на основі ЧСЗК в системі ультразвукової фазової двокоординатної реєстрації положення датчиків НК та визначення їх координат в логічній послідовності представлено на рис. 3.

На першому етапі моделювання було обрано модулі ЧСЗК та виконані необхідні попередні розрахунки. Оскільки максимальна вимірювана відстань становить  $b_{\max} = \sqrt{L^2 + L^2} = \sqrt{2} \approx 1,414\text{ м}$ , максимальне відновлюване ціле число дорівнює  $G_{\max} = b_{\max} / d_0 = 1414$ . Як модулі ЧСЗК обрано значення  $m_1 = 11, m_2 = 12, m_3 = 13$ , які задовольняють умову (6):

$$G_{\max} = 1414 < 11 \cdot 12 \cdot 13 = 1716.$$

Розрахунок ортонормованих базисів дав наступні значення:

$$B_1 = 936, \quad B_2 = 1573, \quad B_3 = 924.$$

Коректність розрахунку базисів підтверджена перевіркою:

$$\sum_{i=1}^3 B_i \pmod{M} = [936 + 1573 + 924] \pmod{1716} = 1.$$

Згідно з рівняннями (4) та (5) отримано такі значення робочих частот та дискретів вимірювання фазових зсувів сигналів:

$$f_1 = 30\text{ кГц}, \quad f_2 = 28\text{ кГц}, \quad f_3 = 25,5\text{ кГц};$$

$$\Delta\varphi_1 = 0,571, \quad \Delta\varphi_2 = 0,524, \quad \Delta\varphi_3 = 0,483.$$

Крім того, на першому етапі були підготовлені масиви даних фазових зсувів сигналів  $\varphi_i^b, \varphi_i^c, i = \overline{1, 3}$  згідно з (3) для наступного віднов-

лення координат точок простору  $L \times L$ . Для більш коректного відпрацювання процесу відновлення повної фази сигналу і обчислення цілих чисел  $G^b, G^c$  усереднення фазових даних не виконувалось, тобто для множин підготовлених фазових

даних  $J = 1$ . Для т. А було задано масив координат  $(x_A, y_A)$  розміром  $1000 \times 1000$ , для яких розраховувались значення сторін  $b, c$  (рис. 1) та відповідні фазові зсуви  $\Phi_i^b(x_A, y_A), \Phi_i^c(x_A, y_A), i = \overline{1, 3}$ .

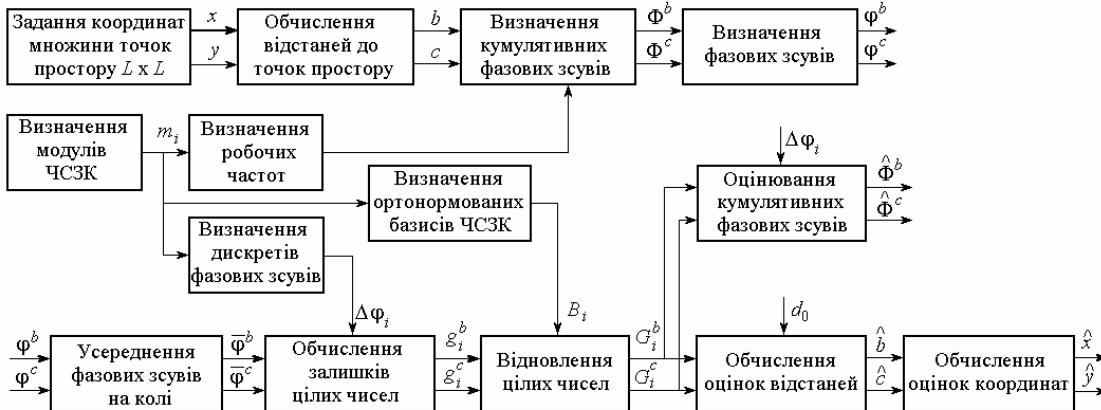


Рис. 3. Структурно-логічна схема процесу визначення координат точок

На другому етапі власне відбувався процес визначення оцінок координат точок  $(\hat{x}_A, \hat{y}_A)$  за отриманими фазовими даними. Контроль правильності обчислення цілих чисел  $G^b(x_A, y_A), G^c(x_A, y_A)$  здійснювався через перевірку відсутності грубих похибок оцінок кумулятивних фазових зсувів

$$\hat{\Phi}_i^b(x_A, y_A) = G_i^b(x_A, y_A) \cdot \Delta\Phi_i,$$

$$\hat{\Phi}_i^c(x_A, y_A) = G_i^c(x_A, y_A) \cdot \Delta\Phi_i, \quad i = \overline{1, 3}.$$

На рис. 4 наведено приклад визначення абсолютної похибки визначення оцінок кумулятивних фазових зсувів для відстані  $c$  на частоті  $f_1 = 30$  кГц та з відповідним значенням дискрету вимірювання фазових зсувів сигналів  $\Delta\Phi_1 = 0,571$ .

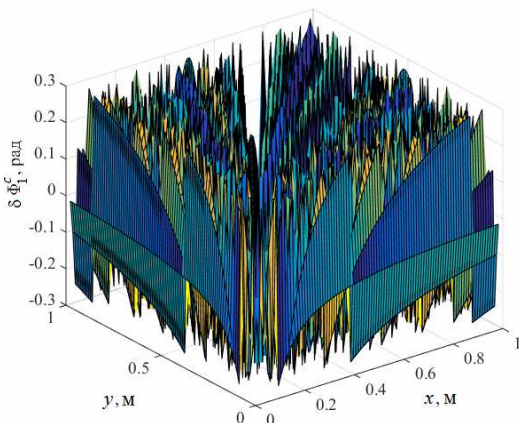


Рис. 4. 3D графіки похибки відтворення кумулятивних фазових зсувів  $\delta\Phi_1^c(x_A, y_A)$  для відстані  $c$  на частоті  $f_1 = 30$  кГц для простору  $L \times L$ . Аналітично ця похибка визначалась за виразом  $\delta\Phi_1^c(x_A, y_A) = \hat{\Phi}_1^c(x_A, y_A) - \Phi_1^c(x_A, y_A)$ .

З рис. 4 видно, що за відсутності похибок визначення фазових зсувів відновлення кумулятивних фазових зсувів відбувається з похибками в межах  $\pm 0,3$  рад, що відповідає дискрету  $\Delta\Phi_1 = 0,571$ .

На практиці на результат відновлення цілих чисел впливають шуми різної природи, до яких відносяться акустичні шуми в каналах передачі акустичних сигналів вздовж відстаней  $b, c$ , електричні шуми в електронній частині приймання та перетворення акустичних сигналів, шуми дискретизації АЦП тощо. Їх наявність може призвести до грубих похибок в оцінках кумулятивних фазових зсувів. Цей висновок ілюструє рис. 5, на якому зображено 3D графік відновленої кумулятивної фази вздовж відстані  $b$  за відсутності шуму (епюра а) та за спотворення даних фазових зсувів гауссовим шумом з середнім квадратичним значенням (СКЗ)  $\sigma_\varphi = 0,006$  рад та нульовим математичним сподіванням.

На рис. 5, б грубі похибки в оцінках кумулятивних фазових зсувів призводять до голкоподібних викидів значень  $\Phi_1^b(x_A, y_A)$ . Механізм цього ефекту полягає в тому, що внаслідок навіть незначних похибок визначення фазових зсувів сигналів в околі значень  $g_i \Delta\Phi_i, i = \overline{1, k}$  відліки на різних шкалах можуть опинитись по різні сторони від цих межових значень. Це призводить до помилки на одиницю визначення одного чи декількох залишків  $g_i$ , а відтак – до виникнення грубої помилки відновлення цілих чисел  $G^b, G^c$  в позиційній системі числення.

Графічне пояснення механізму виникнення грубої похибки дає рис. 6. На цьому рисунку показано фрагменти числової осі з позначеними штрихами цілими числами  $g_{i-1}, g_i, g_{i+1}$ , кружками і хрестиками – відповідно істинні і спотворені шу-



мом значення  $\bar{\varphi}_i / \Delta\varphi_i$ , тобто значення лишків до їх заокруглення до цілого числа. Групи епюр «а» відповідає випадку обчислення залишків без спо-

творень, а епюри «б» і «в» – двом можливим варіантам виникнення грубих похибок у тришкальній фазовій системі.

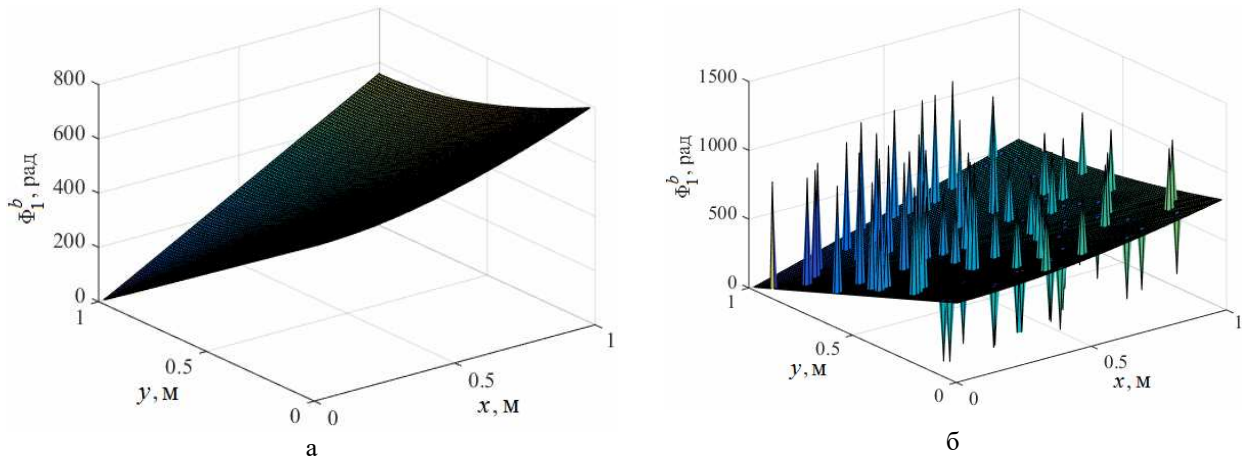


Рис. 5. 3D графіки оцінок кумулятивних фазових зсувів  $\Phi_1^b(x_A, y_A)$  для відстані  $s$  на частоті  $f_1 = 30$  кГц для простору  $L \times L$  за відсутності (а) та наявності фазового шуму з СКЗ  $\sigma_\varphi = 0,006$  рад (б)

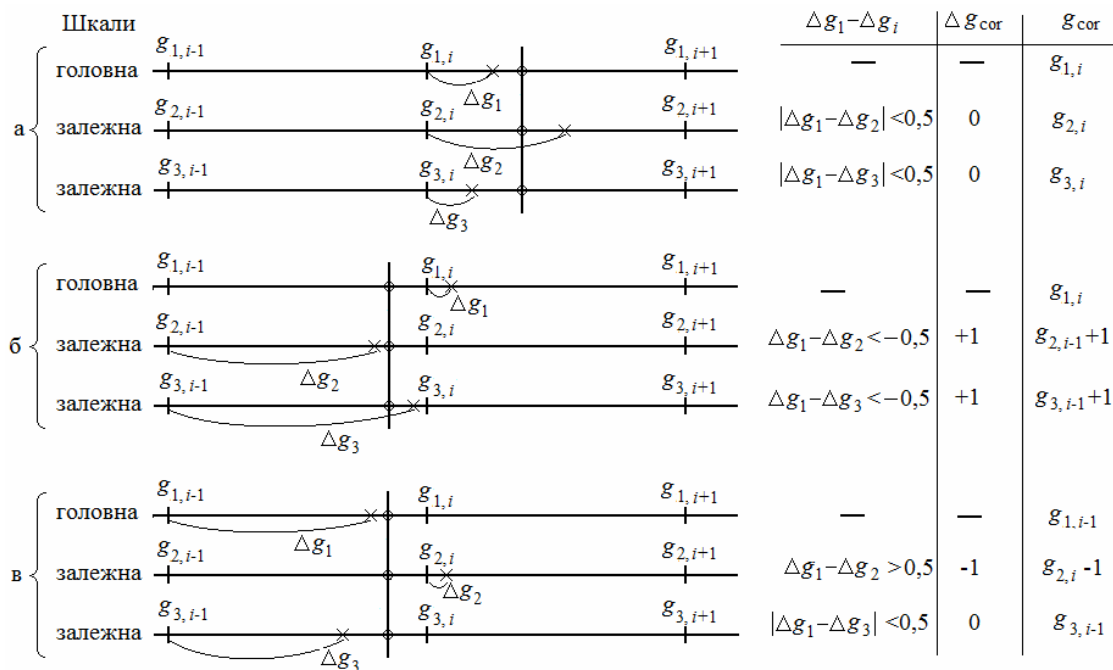


Рис. 6. Виникнення і коригування грубих похибок визначення залишків ЧСЗК за результатами фазових вимірювань на трьох частотах

Шкала залишків  $i = \overline{1, k}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , яка відповідає найбільшій частоті (перша шкала) призначається головною (ведучою), а отримані на ній цілі значення розглядаються як вільні від похибки і не коригуються. Коригування залишків на двох інших шкалах відбувається за аналізом дробової частини залишків виду

$$\Delta g_i = \frac{\bar{\varphi}_i}{\varphi_i} - \left[ \frac{\bar{\varphi}_i}{\varphi_i} \right]^+, \quad i = \overline{1, k}.$$

Аналіз різниць дробових частини залишків

виду  $\Delta g_1 - \Delta g_i$ ,  $i = \overline{2, k}$  дає змогу отримати простий алгоритм коригування залишків, зрозумілий з наведеної на рис. 6 таблиці. Кориговані значення залишків позначені тут як  $g_{cor}$ , а їх визначення наведено у останньому стовпчику таблиці. Використання коригованих значень залишків у формулі (7) надає змогу звести до нехтовно малої величини ймовірність виникнення грубих похибок відновлення цілих чисел  $G^b$ ,  $G^c$  за умови  $\Delta\varphi_1 < 6\sigma_\varphi$ .

Ефективність алгоритму коригування залишків ЧСЗК дає рис. 7, на якому зображено 3D графіки по-

хибок відновлення координати «x» за наявності фазового шуму з СКЗ 0,006 рад та відсутності (а) і наявності (б) алгоритму коригування залишків ЧСЗК.

З рис. 7, б видно, що використання запропонованого алгоритму коригування залишків ЧСЗК

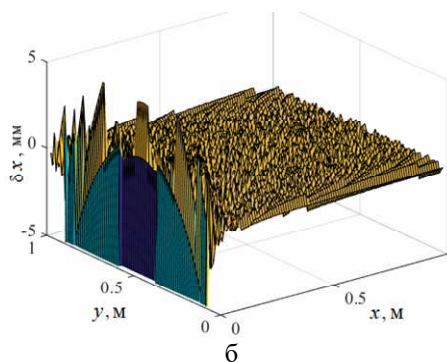
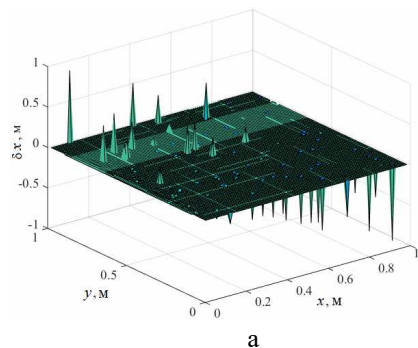


Рис. 7. 3D графіки похибок відновлення координати «x» за наявності фазового шуму з СКЗ 0,006 рад за відсутності (а) та наявності (б) алгоритму коригування залишків ЧСЗК

В цілому проведено моделювання процесу двокоординатної реєстрації положення датчиків НК на основі багаточастотного фазового ультразвукового методу з усуненням багатозначності результатів фазових вимірювань на основі ЧСЗК підтвердило коректність запропонованого алгоритму та його програмної реалізації.

Оскільки визначення фазових зсувів, пов'язаних з поширенням ультразвукових сигналів вздовж вимірюваних відстаней, потребує знання швидкості ультразвукових коливань у повітрі, яка залежить від метеопараметрів середовища, подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку каналу калібрування системи для прецизійного визначення актуального значення швидкості ультразвуку.

### Висновки

Розглянуто удосконалений фазовий ультразвуковий метод двокоординатної реєстрації положення датчиків, орієнтований на використання в системах автоматизованого неруйнівного контролю. Досягнення високої точності та надійності визначення координат забезпечується поєднанням методу трилатерації, як основи для визначення координат датчика НК, фазового багаточастотного методу вимірювання відстаней та числової системи залишкових класів як теоретичної основи розв'язання багатозначності фазових вимірювань.

Результати моделювання процесу двокоординатної реєстрації положення датчиків НК на основі багаточастотного фазового ультразвукового методу з усуненням багатозначності результатів фазових вимірювань на основі ЧСЗК підтвердили коректність запропонованого алгоритму визначення координат датчика та відповідного програмного забезпечення.

Розглянутий метод координатної реєстрації інформації може бути використаний як під час

дає змогу у визначених межах уникнути появи грубих похибок визначення координат положення датчиків НК в розглянутій фазовій ультразвуковій системі їх позиціонування.

розроблення нових автоматизованих засобів НК, так і для вдосконалення існуючих та орієнтованих на «ручний» спосіб реалізації процесу сканування за рахунок автоматичної координатної реєстрації результатів контролю. Крім того запропонований метод усунення багатозначності результатів фазових вимірювань має самостійне значення і може бути використаний у фазовимірювальних системах радіонавігації та радіопеленгації, а також в оптичних інтерференційних системах.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення каналу калібрування системи позиціонування з метою прецизійного визначення актуального значення швидкості ультразвуку, а також на проведення фізичних експериментів на лабораторному макеті системи позиціонування датчиків НК.

### Література

- [1] С. М. Маєвський, К. М. Серий, *Координатна реєстрація інформації в дефектоскопії*. Львів. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, серія Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, 2011.
- [2] О. В. Дергунов, Ю. В. Куц, «Методи реєстрації координат в дефектоскопії», *Системи обробки інформації*, №5 (121), с. 31-35, 2014.
- [3] С. М. Маєвський, *Фазовимірювальні системи неруйнівного контролю*. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
- [4] Albert S. Birks, Robert E. Green, *Nondestructive Testing Handbook. Second edition*. ASNDT, 1991.
- [5] Guoliang Ye, Ben Neal, Alex Boot, Vassilios Kappatos, Cem Selcuk, Tat-Hean Gan. «Development of an ultrasonic NDT system for automated insitu inspection of wind turbine blades», *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, La Cité, Nantes, France, pp.826-833, 2014.
- [6] С. М. Маєвський, К. М. Серий. Безконтактне визначення координат вимірювального перетворювача

- ча дефектоскопу у процесі контролю, *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю*, Харків: НТУ «ХПІ», № 14, с. 3-10, 2009.
- [7] В. П. Бабак, С. В. Бабак, В. С. Берегун, І. В. Богачев, О. В. Гармаш, В. С. Єременко, О. І. Красільников, Ю. В. Куц, Т. А. Полобюк, Л. М. Щербак, *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики*. К.: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2015.
- [8] В. М. Учанін, *Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів: СПОЛЮМ, 2013.
- [9] И. Е. Кинкулькин, В. Д. Рубцов, М. А. Фабрик, *Фазовый метод определения координат*. М.: Сов. радио, 1979.
- [10] В. М. Лобачев, *Радиоэлектронная геодезия*. М.: Недра, 1980.
- [11] V. P. Babak, S. V. Babak, V. S. Eremenko, Y. V. Kuts, M. V. Myslovych, L. M. Scherbak, A. O. Zaporozhets, *Models and Measures in Measurements and Monitoring*. Cham (Switzerland), Springer International Publishing, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-70783-5.
- [12] S. Lawrence Marple, Jr. "Computing the Discrete-Time "Analytic" Signal via FFT", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 47(9), pp. 2600–2603, 1999.
- [13] Alexander D. Poularikas, *Transforms and Applications Handbook*. London, CRC Press LLC, Taylor & Francis Group, Boca Raton, New York, 2010.
- [14] N. Fisher, *Statistical Analysis of Circular Data*. New York, Cambridge University Press, 2000.
- [15] И. Я. Акушский, Д. И. Юдицкий, *Машинная арифметика в остаточных классах*. М.: Сов. Радио, 1968.

UDC 620.179.14

**V. Malko, Y. Kuts, Yu. Lysenko, L. Shcherbak***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***METHOD OF ULTRASONIC PHASE TWO-COORDINATE INFORMATION REGISTRATION FOR AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE TESTING SYSTEMS**

The article is devoted to the issue of improving the coordinate registration of information in means of automated non-destructive testing. Existing systems of non-contact registration of spatial position sensors of non-destructive testing are mostly focused on the use of signal fields of different physical nature, for example, acoustic or optical, which are created around the position of these sensors and amplitude methods of signal processing. These methods do not provide the necessary accuracy of determining the coordinates in the case of using small-aperture sensors of non-destructive testing.

The basis of the proposed technical solution is the trilateration method. The distance between the emitter of ultrasonic vibration, which is structurally connected to the sensor, and the two receivers is determined by the phase method. This method provides increased accuracy in determining the coordinates of the sensor. Eliminating the ambiguity of phase measurements is based on the combination of the multi-frequency method and the numerical system of residual classes. This makes it possible to minimize the probability of incorrect resolution of the ambiguity of the results of phase distance measurements and to ensure high accuracy of coordinate determination (with an absolute error of the order of mm). The idea of the method and the main calculation formulas that make it possible to determine the modules of the numerical system of residual classes and the values of the operating frequencies of ultrasonic oscillations are presented. Matching the discretized values for determining the phase shifts of signals with the modules of the numerical system of residual classes at different operating frequencies makes it possible to reduce the resolution of the ambiguity of the results of phase measurements to the task of restoring integers in the positional counting system from their representation by residuals in the numerical system of residual classes. The mechanism of occurrence of gross errors in the recovery of whole numbers is considered. An algorithm for eliminating this error is proposed. In general, the correctness of the algorithm for determining the sensor coordinates is confirmed by the simulation results. The considered method of two-coordinate information registration can be used both in the development of new automated means of non-destructive testing, and for the improvement of existing ones, which involve a manual method of scanning the surface of testing objects.

**Keywords:** determination of sensor coordinates; phase method; system of residual classes; automated systems of NDT.

Надійшла до редакції  
03 січня 2023 року

Рецензовано  
18 лютого 2023 року



© 2022 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).