



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 94500

(13) C2

(51) МПК

G01N 29/024 (2011.01)

G01N 29/07 (2011.01)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

## (54) СПОСІБ КОНТРОЛЮ ФАЗОВОЇ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ

1

2

(21) а200908799

(22) 21.08.2009

(24) 10.05.2011

(46) 10.05.2011, Бюл.№ 9, 2011 р.

(72) БАЖЕНОВ ВІКТОР ГРИГОРОВИЧ, ЛІГОМІНА  
СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ, МИСЛИВЕЦЬ ЛЮДМИ-  
ЛА ЮРІІВНА(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИ-  
ТУТ"

(56) SU 731370; 30.04.1980

SU 1280520 A1; 30.12.1986

RU 2060474 C1; 20.05.1996

US 5154081; 13.10.1992

GB 798323; 16.07.1958

JP 4339252 A; 26.11.1992

JP 62062266 A; 18.03.1987

(57) Спосіб контролю фазової швидкості ультразвукових коливань, що включає одночасне збудження та випромінювання ультразвукових коливань (УЗ) в об'єкт контролю у двох точках об'єкта на фіксованій дистанції між ними, прийом УЗ коливань в третій точці, розміщеній на об'єкті контролю на одній осі з точками випромінювання УЗ коливань, вимірювання зсуву фаз УЗ коливань у третій точці прийому на різних частотах УЗ коливань в смузі пропускання каналу вимірювання, а фазову швидкість розповсюдження УЗ коливань розраховують згідно з виразом:  $v_{\Phi} = \frac{l}{\tau_{\Phi}}$ , де  $l$  - значення

фіксованої відстані між датчиками,  $\tau_{\Phi}$  - фазовий час затримки УЗ сигналів, який **відрізняється** тим, що вимірювання фазового зсуву УЗ коливань починають виконувати на верхній частоті  $\omega_B$  смуги пропускання каналу вимірювання, а кожне наступне вимірювання виконують на частотах  $(\omega_B - \Omega_i)$ , причому значення частоти  $\Omega_i$  вибирають із умови  $\Omega_1 \cdot \tau_3 < 2 \cdot \pi$ , а наступні значення частоти  $\Omega_i$  ви-

бирають із умови  $E \left| \frac{\Delta\varphi_{i-1} \cdot \Omega_i}{\Omega_{i-1}} - \frac{\Delta\varphi_i}{2 \cdot \pi} + 0,5 \right| = 0$ , де  $E$  -

ціла частина відповідного значення,  $\Delta\varphi_{i-1}$  - максимальна похибка визначення фазового зсуву на частоті  $\Omega_1 (\Omega_{i-1})$ ,  $\Delta\varphi_i$  - максимальна похибка визначення фазового зсуву на частоті  $\Omega_i$ , а значення фазового часу затримки УЗ сигналів визначається як  $\tau_{\Phi} = n \cdot 2 \cdot \pi + \frac{\varphi_B}{\omega_B}$ , де кількість цілих

фазових циклів  $n_i$  на частоті  $\Omega_i$  рівна:

$$n = n_i = E \left| \frac{\Omega_{i+1}}{\Omega_i} \cdot \left( n_{i-1} + \frac{\varphi_i}{2\pi} \right) - \frac{\varphi_{i+1}}{2\pi} + 0,5 \right|, \quad \text{причому}$$

$\Omega_{i+1} = \omega_B$  і  $\varphi_{i+1} = \varphi_B$ , де  $\varphi_i$ ,  $\varphi_B$  - значення фазових зсувів сигналу відповідно на частотах  $\Omega_i$  та  $\omega_B$ .

Винахід належить до контролю фазової швидкості ультразвукових (УЗ) коливань в матеріалах, конструкціях та об'єктах і може використовуватись для контролю фізичних властивостей матеріалів (модуль Юнга та ін.), їх якості, неруйнівного контролю залишкового ресурсу різних виробів, утоми та напруженості досліджуваних конструкцій.

Найбільш близьким аналогом є спосіб вимірювання фазової швидкості ультразвуку (див. патент США 5154081, G01N29/18). Даний аналог включає одночасне збудження і випромінювання УЗ коливань двома датчиками, закріпленими з фіксованою дистанцією та прийом УЗ коливань за допомогою третього датчика, розташованого на одній осі з

(13) C2

(11) 94500

(19) UA

випромінюючими. Це дозволяє значно компенсувати похибку вимірювання фазового зсуву, яка виникає внаслідок зміни зазору між датчиком та об'єктом контролю при проведенні процедури контролю. Визначення швидкості УЗ коливань виконується за допомогою вимірювань часу затримки в робочій смузі перетворювача на декількох частотах. Для забезпечення прийнятної точності вимірювання застосовується метод лінійної регресії фазового спектра, за яким для кожної окремої точки, отриманої в результаті вимірювання фазового зсуву УЗ коливань різних частот від випромінюючих датчиків, проводять фазочастотну характеристику (ФЧХ) через початок координат і розраховують фазовий час затримки, після чого, знаючи фіксовану відстань між випромінюючими датчиками, розраховують фазову швидкість розповсюдження УЗ коливань:  $v_\phi = \frac{l}{\tau_\phi}$ , де  $l$  - значення фік-

сованої відстані між датчиками,  $\tau_\phi$  - фазовий час затримки УЗ сигналів. Головною вимогою для проведення такого контролю є дуже висока точність.

Недоліками найближчого аналога є недостатня точність визначенню фазової швидкості ультразвуку за рахунок нелінійності ФЧХ в смузі пропускання УЗ перетворювачів, низька точність вимірювання часового інтервалу, яка включає в себе похибку, що визначається періодом частоти заповнення і похибку формування часового інтервалу, що в значній мірі обумовлено обмеженими можливостями елементної бази.

В основу винаходу було поставлено задачу підвищення точності визначення фазової швидкості ультразвуку шляхом багаточаскових вимірювань повного фазового зсуву  $\Phi(f)$  УЗ сигналів.

Поставлена задача вирішується тим, що в спосіб контролю фазової швидкості УЗ коливань, який включає їх одночасне збудження та випромінювання в об'єкт контролю у двох точках об'єкта на фіксованій дистанції між ними, прийом УЗ коливань в третій точці, розміщеній на об'єкті контролю на одній осі з точками випромінювання УЗ коливань, вимірювання зсуву фаз УЗ коливань у третій точці прийому на різних частотах УЗ коливань в смузі пропускання каналу вимірювання, фазову швидкість розраховують згідно з виразом:

$v_\phi = \frac{l}{\tau_\phi}$ , де  $l$  - значення фіксованої відстані між

датчиками,  $\tau_\phi$  - фазовий час затримки УЗ сигналів. Новим є те, що вимірювання фазового зсуву УЗ коливань починають виконувати на верхній частоті  $\omega_B$  смуги пропускання каналу вимірювання, а кожне наступне вимірювання виконують на частотах  $(\omega_B - \Omega_i)$ , причому значення частоти  $\Omega_1$ , вибирають із умови  $\Omega_1 \cdot \tau_\phi < 2 \cdot \pi$ , а наступні значення частоти  $\Omega_i$ , вибирають із умови

$E \left| \frac{\Delta\phi_{i-1} \cdot \Omega_i}{\Omega_{i-1}} - \frac{\Delta\phi_i}{2 \cdot \pi} + 0.5 \right| = 0$ , де  $E$  - ціла частина від-

повідного значення,  $\Delta\phi_{i-1}$  - максимальна похибка визначення фазового зсуву на частоті  $\Omega_1 (\Omega_{i-1})$ ,

$\Delta\phi_i$  - максимальна похибка визначення фазового зсуву на частоті  $\Omega_i$ , а значення фазового часу затримки УЗ сигналів визначається як

$\tau_\phi = n \cdot 2 \cdot \pi + \frac{\phi_B}{\omega_B}$ , де кількість цілих фазових циклів

$n_i$  на частоті  $\Omega_i$  рівна:

$n = n_i = E \left| \frac{\Omega_{i+1}}{\Omega_i} \cdot \left( n_{i-1} + \frac{\phi_i}{2\pi} \right) - \frac{\phi_{i+1}}{2\pi} + 0.5 \right|$ , причому

$\Omega_{i+1} = \omega_B$  і  $\phi_{i+1} = \phi_B$ , де  $\phi_i$ ,  $\phi_B$  - значення фазових зсувів сигналу відповідно на частотах  $\Omega_i$  та  $\omega_B$ .

Суть винаходу полягає в тому, що перше вимірювання фазового зсуву  $\phi_B$  виконується на верхній частоті  $\omega_B$  смуги пропускання, де повний фазовий зсув визначається, як:

$\Phi_1 = \omega_B \cdot \tau_\phi = 2 \cdot \pi \cdot n + \phi_B$ . Потім вимірюється фазо-

вий зсув  $\Phi_{\Omega 1}$  на частоті  $(\omega_B - \Omega_1)$ , а повний фазовий зсув сигналу визначається, як:  $\Phi_2 = (\omega_B - \Omega_1) \cdot \tau_\phi = 2 \cdot \pi \cdot n_1 + \Phi_{\Omega 1}$ . Таким чином, значення фазового зсуву  $\phi_1$ , на частоті  $\Omega_1$ , яку вибирають із умови однозначності  $\Omega_1 \cdot \tau_\phi = 2 \cdot \pi$ , буде визначатись за виразом:

$\Phi_{\Omega 1} = \Phi_1 - \Phi_2 = \Omega_1 \cdot \tau_\phi = \phi_1$ , де  $\phi_1$  - розраховане

значення фазового зсуву на частоті  $\Omega_1$ . Аналогічно далі проводимо вимірювання фазового зсуву сигналу  $\Phi_{\Omega 2}$  на наступній частоті  $(\omega_B - \Omega_2)$ , де повний фазовий зсув буде визначатись, як:  $\Phi_3 = (\omega_B - \Omega_2) \cdot \tau_\phi = 2 \cdot \pi \cdot n_2 + \Phi_{\Omega 2}$ , тому можна визначити фазовий зсув на частоті  $\Omega_2$ :

$\Phi_{\Omega 2} = \Phi_1 - \Phi_3 = (\omega_B \cdot \tau_\phi) - (\omega_B - \Omega_2) \cdot \tau_\phi = \Omega_2 \cdot \tau_\phi = \phi_2$ .

Потім вимірюємо наступне значення фазового зсуву сигналу  $\Phi_{\Omega 3}$  на частоті  $(\omega_B - \Omega_3)$ , де повний фазовий зсув буде визначатись, як:  $\Phi_4 = (\omega_B - \Omega_3) \cdot \tau_\phi = 2 \cdot \pi \cdot n_3 + \Phi_{\Omega 3}$ , а розраховане значення фазового зсуву на частоті  $\Omega_3$  визначається за виразом:

$\Phi_{\Omega 3} = \Phi_1 - \Phi_4 = (\omega_B \cdot \tau_\phi) - (\omega_B - \Omega_3) \cdot \tau_\phi = \Omega_3 \cdot \tau_\phi = \phi_3$  і т. д.

При здійсненні способу розраховується повний фазовий зсув УЗ сигналів  $\Phi_B$  на верхній частоті:  $\Phi_B = 2 \cdot \pi \cdot n + \phi_B$ , а з результатів вимірювань на проміжних частотах в смузі пропускання УЗ перетворювачів, розрахованих згідно з запропонованою формулою:

$n = n_i = E \left| \frac{\Omega_{i+1}}{\Omega_i} \cdot \left( n_{i-1} + \frac{\phi_i}{2\pi} \right) - \frac{\phi_{i+1}}{2\pi} + 0.5 \right|$ , значення

повного фазового зсуву уточнюється.

Забезпечення точності вимірювання фазового часу затримки УЗ коливань  $\tau_\phi$  буде визначатись результатом вимірювання на верхній частоті:

$\Delta\tau_\phi = \frac{\Delta\phi_B}{\omega_B}$ , де  $\Delta\phi_B$  - максимальне значення похи-

бки фазометра,  $\omega_B$  - верхня частота вимірювання, який буде найбільш точним тому, що при похибці вимірювання фазометра  $\Delta\varphi_B = 0,1^\circ$ , на частоті 10 МГц, одержують точність

$\Delta\tau_\Phi = \frac{100\text{нс}}{3600} = 2,7 \cdot 10^{-11}\text{нс}$ . Вимірювання виконуються у діапазоні  $0 \dots 360^\circ$  за допомогою фазометра.