

# Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 620.179.16

О.Д. Близнюк<sup>1</sup>, Ю.А. Олійник<sup>1</sup>, В.Ю. Куц<sup>2</sup>, Ю.В. Куц<sup>1</sup>, О.В. Монченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет, Київ

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «КПІ», Київ

## ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДВОШКАЛЬНОГО СПОСОБУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ВИРОБІВ

*Розглянуто особливості використання ультразвукового двошкального способу вимірювання товщини виробів. Значення товщини, отримане за результатами аналізу часу поширення фазоманіпульованого сигналу в об'єкті контролю уточнюється за даними вимірювань фазових зсувів гармонічної несучої цих сигналів.*

**Ключові слова:** ультразвукова луна, імпульсна товщинометрія, двошкальний спосіб вимірювання, фазова характеристика сигналу.

### Вступ

Точність вимірювання товщини  $h$  виробів ультразвуковим лунаїмпульсним методом неруйнівного контролю (НК) суттєво залежить від точності визначення часової затримки  $\tau$  поширення ультразвукового імпульсу в об'єкті контролю (ОК) [1]. За відомої швидкості  $c$  поширення ультразвукових хвиль в матеріалі ОК вона визначається як

$$h = 0,5 \cdot c \cdot \tau. \quad (1)$$

Різні варіанти реалізації ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії відрізняються способами визначення  $\tau$ . Найбільш поширеним є спосіб вимірювання  $\tau$  за обвідними донних імпульсів [1].

В роботах [2, 3] представлено фазовий спосіб вимірювання часової затримки сигналів в ультразвукових товщиномірах, який ґрунтується на використанні особливих точок сигналів [6]. Такі особливі точки в [2, 3] формуються за рахунок фазової маніпуляції несучої імпульсного сигналу. Сутність представленого способу полягає у вимірюванні  $\tau$  за моментами стрибкоподібної зміни (далі – стрибками) фазової характеристики (ФХ) донних сигналів.

Певним недоліком даного способу, що обмежує його використання на практиці, є низька завадозахищеність: у випадку дії у вимірювальному каналі шумів часове положення особливих точок фазоманіпульованого сигналу може коливатись в певних межах і вносити суттєву похибку в результат вимірювання затримки сигналу. В той же час існує можливість підвищити точність визначення затримки за рахунок вимірювання і врахування значення усередненого фазового зсуву несучої донних сигналів.

Відомі двошкальні способи прецизійного вимірювання фазового часу затримки сигналів [4], метод ноніуса для визначення фазових зсувів сигналів [5], які потребують виконання вимірювань на різних частотах, що не завжди можна реалізувати технологічно для ультразвуку. Крім того, необхідно додатково враховувати фазовий зсув, який вноситься електроакустичним трактом (фазовий зсув перетворювача, дисперсійність середовища ОК, фазовий зсув пристроїв оброблювання тощо) на кожній робочій частоті.

Представлений в [4] багатошкальний спосіб вимірювання фазового часу затримки сигналів полягає в тому, що за допоміжним вимірюванням фазового зсуву сигналів  $\varphi_n$  на низькій частоті  $f_n$  тестового сигналу визначають число цілих фазових циклів  $n$ , яке міститься у повному фазовому зсуві сигналів високої частоти  $f_B$ , який відповідає часу затримки сигналу  $\tau$ . Значення  $f_n$  вибирається з умови однозначності результату вимірювання фазових зсувів, тобто з умови  $\varphi_n = 2\pi f_n \tau < 2\pi$ .

Результат вимірювання затримки сигналу на високій частоті представляється виразом:

$$\tau_\Phi = f_B^{-1} \left( n + \frac{\hat{\varphi}_B}{2\pi} \right), \quad (2)$$

де  $\varphi_B$  – виміряне значення фазового зсуву сигналів частотою  $f_B$ ,  $0 \leq \varphi_B < 2\pi$ . Число  $n$  обчислюється за виразом:

$$n = \left[ \frac{\hat{\varphi}_n f_B}{2\pi f_n} - \frac{\hat{\varphi}_B}{2\pi} + 0,5 \right]^+, \quad (3)$$

де  $[\cdot]^+$  – операція виділення цілої частини числа.

Цей спосіб має обмеження для використання в ультразвуковій товщинометрії, оскільки потребує виконання фазових вимірювань в широкому діапазоні частот. Чим більше товщина вимірюваного ОК, тим нижчою повинна бути частота  $f_n$  для однозначного вимірювання  $\varphi_n$ . З іншого боку, прагнення підвищення точності вимірювання передбачає підвищення частоти  $f_b$ . Разом це призводить до розширення частотного діапазону сигналів, в той час як ультразвукові перетворювачі працюють в обмеженому частотному діапазоні.

Тому метою досліджень є удосконалення способу ультразвукової луна імпульсної товщинометрії, який ґрунтується на використанні імпульсних сигналів з фазоманіпульованою гармонічною несучою шляхом розробки прецизійного двошкального фазового способу вимірювань часової затримки ультразвукових сигналів в електроакустичних трактах ультразвукових товщиномірів на одній робочій частоті.

**Постановка задачі.** Вимірюється товщина  $h$  виробу ультразвуковим лунаїмпульсним методом. Швидкість  $c$  поширення ультразвукових хвиль в матеріалі виробу вважається відомою. Доступним дослідженню є фазоманіпульований сигнал з гармонічною несучою відомої частоти  $f$ , який поширюється в електроакустичному тракті товщиноміра. Необхідно проаналізувати двошкальний фазовий метод ультразвукового прецизійного вимірювання  $h$  на основі більш повного врахування особливостей ФХ інформаційних фазоманіпульованих сигналів.

### Розв'язок поставленої задачі

Ідея способу вимірювання  $h$  полягає у наступному. Для визначення часової затримки  $\tau$  формується фазоманіпульований акустичний зонduючий сигнал виду:

$$u(t) = \begin{cases} U(t) \sin 2\pi ft, & t \in [0, \tau_1], \\ -U(t) \sin 2\pi ft, & t \in [\tau_1, \tau_2], \\ 0 & t \in [\tau_2, T_n] \end{cases} \quad (4)$$

де  $U(t)$  – обвідна сигналу,  $f$  – частота заповнення радіоімпульсу,  $\tau_1$  – момент маніпуляції фази,  $\tau_2$  – тривалість радіоімпульсу,  $T_n$  – період повторення радіоімпульсів.



Рис. 1. Структурно-логічна схема двошкального методу ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії

Для прийнятих донних сигналів визначаються їх фазові характеристики і за положенням в часі стрибків цих характеристик визначається часова затримка  $\tau_3$  [2, 3].

Для уточнення значення часового інтервалу виконується вимірювання фазового зсуву несучої радіоімпульсного сигналу відносно опорного сигналу  $u_0(t)$  (без маніпуляції) на початку і в кінці вимірюваних часових інтервалів, а уточнене значення часової затримки  $\hat{\tau}$  отримується розрахунковим шляхом.

Запропонований двошкальний спосіб визначення  $\tau$  реалізується таким чином:

– за «грубою» шкалою вимірюється однозначне (але зі значною можливою похибкою) значення  $\tau$  за стрибками ФХ донних сигналів;

– за «точною» шкалою здійснюється прецизійне вимірювання частки  $\tau$  в межах напівперіода несучої;

– виконується узгодження отриманих результатів і обчислення оцінки  $\hat{\tau}$ .

Суть двошкального методу проілюстровано на рис. 1.

Цим методом передбачено визначення  $\tau$  і фазових зсувів  $\Delta\varphi$  сигналів на одній методологічній основі – через ФХ донних сигналів з фазоманіпульованою несучою.

Після поширення в ОК донний сигнал поступає на дефектоскоп, де аналого-цифровий перетворювач формує вибірки зонduючого і донних сигналів  $u[j]$ .

Дискретна ФХ сигналу визначається за допомогою дискретного перетворення Гільберта [7] за формулою:

$$\Phi[j] = \arctg \frac{\hat{u}[j]}{u[j]} + K[\hat{u}[j], u[j]], \quad (5)$$

де  $\hat{u}[j]$  – гільберт-образ сигналу  $u[j]$ ,  $K$  – оператор розгортки ФХ сигналів за межі інтервалу  $[0, 2\pi]$ .

ФХ фазоманіпульованого сигналу містить стрибки у моменти часу, які відповідають виконанню маніпуляції несучого колювання. Часове положення стрибків ФХ сигналів визначається за її похідною  $\frac{d\Phi(t)}{dt}$ .

Ці стрибки з метою підвищення достовірності результатів вимірювання можуть бути виділені за допомогою стробування ФХ допоміжними імпульсами, отриманими з обвідної аналізованого сигналу:

$$A[j] = \sqrt{u^2[j] + \hat{u}^2[j]}. \quad (6)$$

Грубе значення затримки визначається як часовий інтервал  $\tau_3$ . Значення цього інтервалу вимірюється з похибкою, спричиненою дією шуму, що супроводжує процес випромінювання, поширення в ОК і прийому ультразвукового сигналу.

В досліджуваному способі ультразвукової товщинометрії часова затримка  $\tau$  визначається як фазовий час поширення сигналу в ОК:

$$\hat{\tau} = \left( n + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \frac{1}{f}. \quad (7)$$

Значення часу затримки в періодах несучого коливання  $n/f$  визначається через вимірювання часового інтервалу між стрибками ФХ сигналу. Уточнююче значення затримки визначається на основі вимірювання фазового зсуву сигналів  $\Delta\varphi$  в кінці і на початку цього інтервалу, яке здійснюється

відносно фази  $\Phi_0$  гармонічного сигналу несучої (рис. 1):

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}. \quad (8)$$

Узгодження з  $\frac{\Delta\varphi}{2\pi}$  значення кількості фазових циклів відбувається за формулою:

$$n = \left[ f\tau_3 - \frac{\Delta\varphi}{2\pi} + 0,5 \right]^+. \quad (9)$$

З урахуванням відомої швидкості  $c$  поширення ультразвуку в ОК, товщина ОК визначається за формулою:

$$h = \frac{c}{2f} \left( n + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = \frac{c}{2f} \left( \left[ f\tau_3 - \frac{\Delta\varphi}{2\pi} + 0,5 \right]^+ + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right). \quad (10)$$

Структура програмно-апаратної реалізації ультразвукового двохшального способу вимірювання товщини виробів наведена на рис. 2.

Підтвердження працездатності запропонованого способу проведено шляхом комп'ютерного вимірювального експерименту.

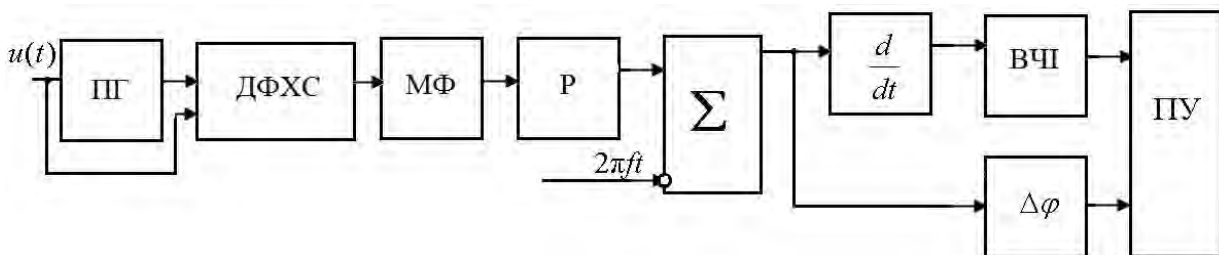


Рис. 2. Структура програмної реалізації процесу оброблення сигналів в ультразвуковому двохшальному способі вимірювання товщини виробів

## Результати моделювання

Моделювання виконувалось у три етапи:

1) моделювання одношального способу визначення часової затримки. На цьому етапі отримувалось грубе значення часової затримки  $\tau_3$ ;

2) моделювання процесу вимірювання фазового зсуву сигналів  $\Delta\varphi$  (моделювання вимірювань за уточнюючою шкалою);

3) узгодження грубого і уточнюючого значення затримки та формування результату.

У проведеному модельному експерименті формувался радіоімпульсний сигнал з фазоманіпульованою несучою тривалістю чотири періоди несучого коливання з параметрами:

$$U = 5 \text{ В}, f = 5 \text{ МГц},$$

$$\tau_1 = 2T, \tau_i = 4T,$$

$$K_T = \frac{1}{7}, \tau_3 = 12T,$$

де  $T = \frac{1}{f}$  – період заповнення сигналу,  $K_T$  – коефіцієнт електроакустичного тракту товщиноміра.

Результати моделювання процесу оброблення сигналів в структурі рис. 2 наведені на рис. 3.

Зонduючий та донний імпульси зображені на рис. 3, а.

На рис. 3, б представлена розгорнута ФХ (8) прийнятого сигналу, яка отримана таким чином.

Після визначення в блоці перетворення Гільберта (ПГ, рис. 2) гільберт-образу сигналу  $\hat{u}[j]$  в блоці ДФХС (дискретна фазова характеристика сигналу) отримують оцінку дробової частини ФХ сигналу, тобто частини ФХ сигналу в межах інтервалу  $[0, 2\pi)$ . Остання може бути спотворена неінформативними стрибками, які викликані дією шуму і мають властивості імпульсної завади. З метою фільтрації дробової частини ФХ сигналу в структуру на рис. 2 включений медіанний фільтр (МФ) [8]. Роз-

горнуту ФХ сигналу отримують в блоці розгортання (Р). В суматорі  $\Sigma$  з отриманої ФХ сигналу вилучається лінійний тренд, тобто визначається різниця  $\Delta\Phi = \Phi[j] - 2\pi f T_d j$ , де  $T_d$  – період дискретизації сигналу. Графік цієї різниці після диференціювання в блоці  $\frac{d}{dt}$  представлено на рис. 3, в. Селекція стрибків

ФХ сигналу, за якими визначається  $\tau_3$ , може бути виконана за обвідною сигналу, яка визначається за виразом (6) і графік якої представлений на рис. 3, г (в структурі на рис. 2 блок селекції відсутній). У вимірювачі часових інтервалів (ВЧІ) відбувається визначення  $\tau_3$  за попередньо виділеними стрибками ФХ сигналу (рис. 3, д).

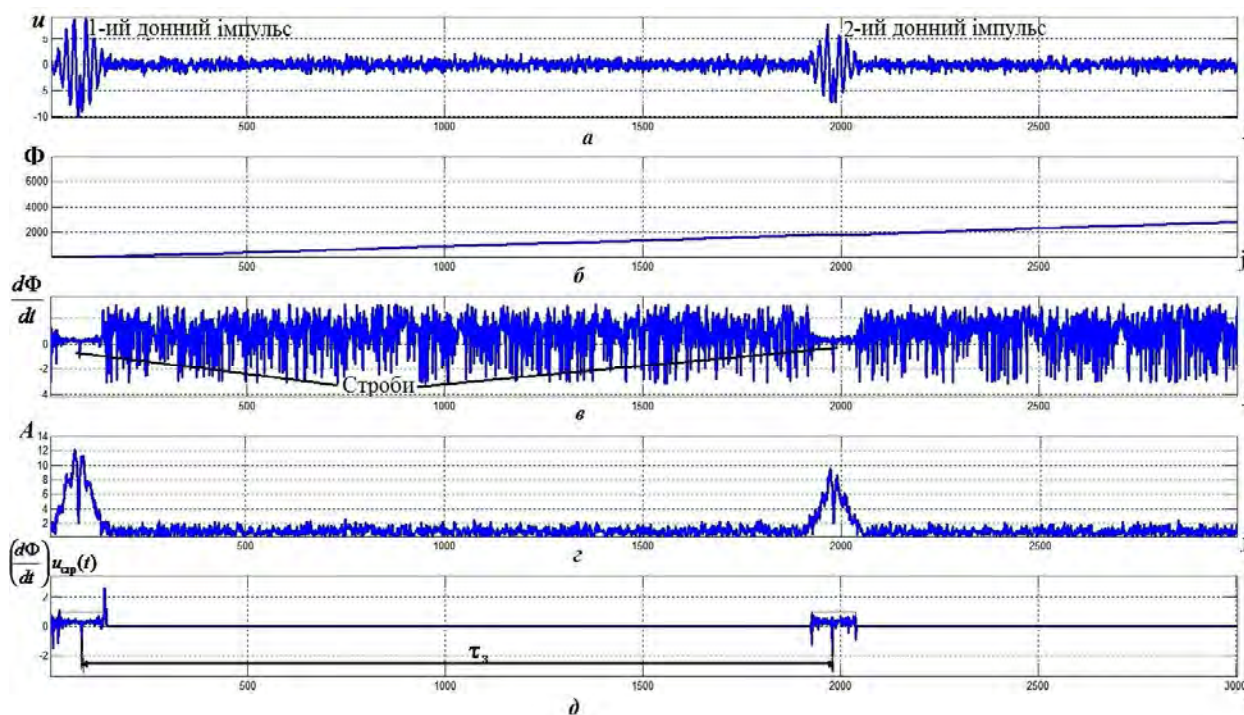


Рис. 3. Результати моделювання двоскального способу ультразвукової товщинометрії

Усереднене значення фазових зсувів  $\Delta\varphi$  несучої отримують в блоці  $\Delta\varphi$ . Отримані значення  $\tau_3$  та  $\Delta\varphi$  поступають на пристрій узгодження (ПУ), який визначає суму  $\left(n + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right)$ . Після цього значення товщини  $h$  обраховується за формулою (10).

В проведених експериментальних дослідженнях цього способу введення в об'єкт контролю і отримання ультразвукового сигналу відбувалось за допомогою сумщеного п'єзоелектричного перетворювача.

Структура експериментальної установки для дослідження запропонованого способу ультразвукової товщинометрії наведена на рис. 4.

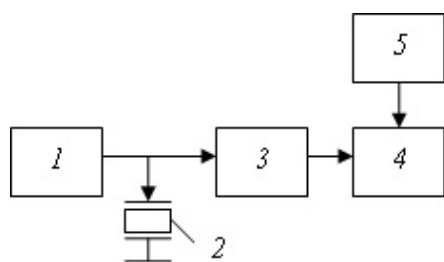


Рис. 4. Структура експериментальної установки

Експериментальна установка містить:  
 1 – програмований генератор сигналів;  
 2 – сумщений п'єзоелектричний перетворювач типу П211-5-П20;  
 3 – одноканальний дефектоскоп Socomate USPC 3100 LA;

4 – персональний комп'ютер;  
 5 – програмне забезпечення.

Окремо було виконано дослідження амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) перетворювача. Таке дослідження виконане за допомогою цифрового осцилографа типу Tektronix TDS 2002С.

Отриманий графік АЧХ наведено на рис. 5. З цього графіка визначено, що смуга пропускання перетворювача на рівні – 6 дБ становить 3,75 МГц.

На стенді (рис. 4) було експериментально підтверджено можливість передавання через електроакустичний тракт товщиноміра фазоманіпульованих сигналів без порушення їх структури.

Для заданих вихідних параметрів і умов проведення експериментів використання двоскального способу вимірювання товщини ОК привело до зменшення абсолютної похибки вимірювання часової затримки  $\tau$  на  $(2 \div 3)T_d$ .



Рис. 5. АЧХ перетворювача П211-5-П20

## Висновки

В статті проаналізовано використання ультразвукового двохшального фазового способу вимірювання товщини виробів.

Перевагою досліджуваного способу є те, що і грубе, і уточнююче значення часового інтервалу визначається за фазовою характеристикою зондуючих сигналів без зміни частоти несучої, що не потребує розширення робочої смуги частот товщиноміра.

Виконані комп'ютерні обчислювальні експерименти на заданих моделях сигналів дозволили відпрацювати програмну реалізацію процесу оброблення фазоманіпульованих сигналів і підтвердити ефективність двохшального фазового способу ультразвукової товщинометрії для підвищення точності визначення затримки інформаційних сигналів, які спостерігаються на фоні адитивних шумів. Абсолютна похибка вимірювання часової затримки знижена на  $(2 \div 3)T_d$ .

Виконані експериментальні дослідження довели можливість поширення фазоманіпульованих сиг-

налів в електроакустичному тракту ультразвукового товщиноміра і можливість уточнення затримки шляхом врахування фазових зсувів несучої імпульсних сигналів.

## Список літератури

1. *Незрушающий контроль и диагностика: справочник* / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; под ред. В.В. Клюева. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. Пат. 79972 Україна, МПК G01B 17/02 Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів / Ю.В. Куц, В.Л. Найда, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко; заявник та патентовласник Нац. авіац. ун-т. – и 201212606; заявл. 05.11.2012; опубл. 13.05.2013. Бюл.№9.
3. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц, Ю.А. Олійник, О.Д. Близнюк, О.В. Монченко // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2013. – №1. – С. 23-37.
4. АС 864238 /СССР/. Способ измерения фазового времени задержки сигналов / В.Г. Баженов, Е.К. Батуревич, С.М. Маевский. – Опубл. в Б.И., 1981, №34.
5. Гула І.В. Визначення властивостей методу коінциденції для вимірювання фазових зсувів сигналів / І.В. Гула // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2013. – №2. – С. 62-66.
6. Кинкулькин И.Е. Фазовый метод определения координат / И.Е. Кинкулькин, В.Д.Рубцов, М.А. Фабрик. – М.: Сов. радио, 1979. – 280 с.
7. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с. – 471 с.
8. Кулаков Ю.О. Дослідження кругових медіанних фільтрів в задачах аналізу фазових характеристик сигналів / О.Ю. Кулаков, В.Ю. Куц // *Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е.Пухова НАН Украины. Сб. трудов конференции «Моделирование, 2008»*. – Т. 2. – С. 429-434.

Надійшла до редколегії 12.04.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.М. Щербак, Національний авіаційний університет, Київ.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДВУШКАЛЬНОГО СПОСОБА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЙ

Е.Д. Близнюк, Ю.А. Олейник, В.Ю. Куц, Ю.В. Куц, Е.В. Монченко

*Рассмотрены особенности использования ультразвукового двухшального способа для повышения точности измерения толщины изделий. Значение толщины, полученное по результатам анализа времени распространения фазоманипулированного сигнала в объекте контроля, уточняется по данным измерения фазовых сдвигов этих сигналов.*

**Ключевые слова:** ультразвуковая эхоимпульсная толщинометрия, двухшальный способ измерения, фазовая характеристика сигнала.

## THE USE OF ULTRASONIC DESCALING METHOD TO IMPROVE THE ACCURACY THICKNESS MEASUREMENT PRODUCTS

O.D. Bliznyuk, J.A. Oliynyk, V.J. Kutz, J.V. Kutz, O.V. Monchenko

*The use of ultrasonic descaling method to improve the accuracy of thickness measurement products. The thickness value obtained from the results of the analysis of the propagation time phase manipulating signal in the testing object is specified by measuring the phase shifts of these signals.*

**Keywords:** the help of echo pulse ultrasonic thickness gauging, descaling measurement method, the phase characteristic of the signal.