

УДК 620.179.16

В.М. Мокійчук, О.В. Монченко, Ю.А. Олійник

Національний авіаційний університет, Київ

## МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПРУЖНИХ КОНСТАНТ МАТЕРІАЛІВ

У статті розглянуто спосіб визначення пружних констант матеріалів на основі прецизійного вимірювання товщини матеріалів та наведено методика оцінювання невизначеності для даного способу.

**Ключові слова:** пружні константи, модуль Юнга, ультразвукова луно-імпульсна товщинометрія, невизначеність, об'єкт контролю.

### Вступ

В наш час активно розробляються нові конструкційні матеріали, такі, наприклад, як композиційні, армовані високоміцними і високомодульними безперервними волокнами, які мають широке застосування в різних галузях господарства. У зв'язку з цим визначення значень пружних констант нових матеріалів є актуальною задачею.

Для надійної експлуатації виробів з різних конструкційних матеріалів необхідно достовірно оцінити їх ресурс зношування, виконати прогнозування залишкового ресурсу конструктивних вузлів в процесі експлуатації, продовження терміну служби після відпрацювання об'єктами нормативного терміну. Для цього також необхідно точно визначити величини пружних констант.

Відомо багато способів експериментального визначення пружних констант матеріалів [1,2]. Їх суть зводиться, в основному, до порівняння частот власних коливань пружних систем, отриманих розрахунковим шляхом і визначених експериментально. Зразки матеріалів зазвичай мають форму призми і циліндрів, часто відносно коротких.

Інший важливий для практики спосіб визначення пружних констант ґрунтується на вимірюванні швидкості пружних коливань в матеріалі об'єкта контролю (ОК). Саме цей метод аналізується в статті. Але для задач аналізу міцності та прогнозу щодо визначення ресурсу ОК важливим є не тільки отримання найбільш імовірного значення пружних констант, але й визначення похибки її оцінювання.

В статті запропоновано розв'язання цієї задачі на основі концепції невизначеності [3-5].

Отже, метою статті є розроблення методу оцінювання невизначеності вимірювання пружних констант нових конструкційних матеріалів.

### Постановка задачі

Розглядається спосіб визначення модуля Юнга  $Y^{Ю}$ , що ґрунтується на його зв'язку зі швидкістю

ультразвукових поздовжніх хвиль  $c$ , для якого рівняння перетворення задається виразом [6]:

$$c = \sqrt{Y^{Ю}/\rho},$$

де  $\rho$  – густина матеріалу.

З іншого боку, швидкість ультразвукових поздовжніх хвиль  $c$  можна визначити за формулою:

$$c = 2h/\tau [6],$$

де  $\tau$  – час поширення пружної хвилі в товщі ОК,  $h$  – товщина ОК.

Швидкість ультразвукових коливань вимірюється непрямим методом через  $h$  і  $\tau$ . Для досліджуваного зразка існує можливість вимірювання його геометричних розмірів. Затримка  $\tau$  визначається фазовим методом [7, 8].

Співставивши формули визначення швидкості  $c$  та з умови  $\rho = m/V$  можна отримати вираз для підрахунку модуля Юнга:

$$Y^{Ю} = \frac{4h^2m}{\tau^2V}, \quad (1)$$

де  $m$ ,  $V$  – маса та об'єм ОК відповідно, а потім оцінити невизначеність вимірювання модуля Юнга.

### Розв'язок поставленої задачі

З метою уточнення рівняння перетворення і визначення впливаючих факторів більш детально розглянемо спосіб підвищення точності вимірювання товщини ОК, що реалізується на прикладі відомих функціональних блоків та пристроїв. На рис. 1 зображено блок-схему пристрою, який реалізує запропонований спосіб і який містить:

1 – програмований генератор сигналів: формувач фазоманіпульованого сигналу (генератор ФС), підсилювач потужності.

2 – суміщений п'єзоелектричний перетворювач П211-5-П20.

3 – одноканальний дефектоскоп SocomateUSPC 3100 LA: вхідний пристрій формує вибірку миттєвих значень сигналу (ПР), АЦП.

4 – персональний комп'ютер: обчислювач фазової характеристики (ФХ) сигналу (ПГ), диференціатор, вимірювач фазових зсувів сигналів (ВФЗС),

вимірювач часових інтервалів (ВЧІ), пристрій стикування (узгоджує грубо-точно).

5 – блок програмного забезпечення.

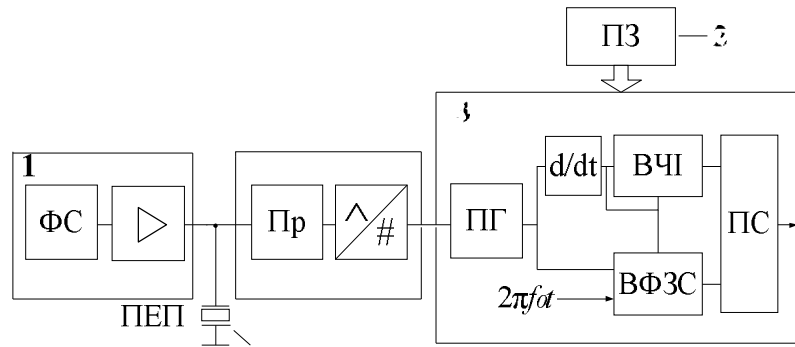


Рис. 1.– Структура пристрою визначення пружних констант матеріалів

Генератор 1 формує фазоманіпульований радіоімпульсний сигнал виду,

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

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

Сигнал  $u(t)$  подається на суміщений п'єзоелектричний перетворювач 2, який перетворює електричний сигнал в ультразвуковий. Прийнятий після поширення в ОК ультразвуковий сигнал перетворюється тим же перетворювачем 2 в електричний і подається на дефектоскоп 3. Останній виконує аналого-цифрове перетворення сигналів і формує вибірки зонduючого і відбитих сигналів  $u[j]$  і передає їх для подальшої обробки в блок 4. Визначення товщини ОК виконується у відповідності до алгоритмів програмного забезпечення 5.

Дискретна фазова характеристика сигналу визначаються за допомогою дискретного перетворення Гільберта [3] за формулою:

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

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

Фазова характеристика фазоманіпульованого сигналу містить стрибки у моменти часу, які відповідають виконанню маніпуляції несучого коливання.

Часове положення стрибків ФХ сигналів може бути визначено за її похідною  $\frac{\partial \tilde{\Phi}(t)}{\partial t}$ . Ці стрибки з метою підвищення достовірності результатів вимі-

рювання можуть бути виділені за допомогою стробування ФХ обвідними відбитих сигналів:

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

часове положення яких відповідає затримці сигналу при поширенні у ОК.

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

Згідно з винаходом реалізується двоскальний спосіб вимірювання, в якому часова затримка на поширення сигналу в ОК визначається через фазовий час його затримки:

$$\tau_3 = \left( n + \frac{\Delta\phi}{2\pi} \right) \frac{1}{f}.$$

Узгодження грубого і точного значень (уточнення цілої кількості фазових циклів) відбувається за формулою:

$$n = \left[ f\tau_3 - \frac{\Delta\phi}{2\pi} + 0,5 \right]^+,$$

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

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

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

Даний спосіб дає можливість прецизійного вимірювання товщини виробів за умови дії шумів в електроакустичному тракті товщиноміра.

Оцінимо невизначеність пружних констант матеріалів на прикладі модуля Юнга.

Експериментально модуль Юнга  $Y^{Ю}$  пов'язаний з швидкістю поширення поздовжньої ультраз-

вукової хвилі  $s$  в товщині об'єкта контролю (ОК)  $h$  (1).

Методика обчислення невизначеності включає наступні етапи:

1. Побудова діаграми впливаючих факторів (діаграми Ішкави). Виходячи з рівняння перетворення

(1) визначимо основні та додаткові впливаючі фактори (рис. 2).

2. Формування бюджету невизначеності згідно з діаграмою Ішкави.

Для задачі, що розглядається, бюджет невизначеності представлений в табл. 1.

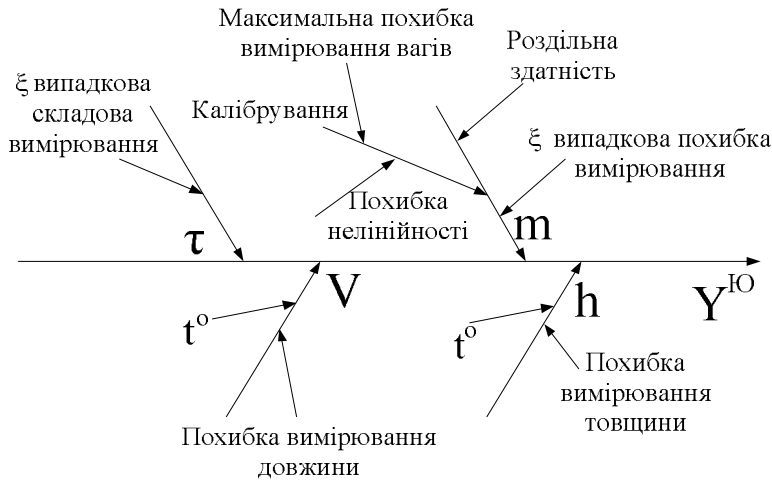


Рис. 2. Діаграма Ішкави для визначення пружних констант матеріалів

Таблиця 1

Бюджет невизначеності для визначення модуля Юнга

| Позначення | СКЗ            | Впливаючий фактор                                   | Категорія невизначеності | Закон розподілу імовірності | Сумарна стандартна невизначеність   | Коефіцієнт впливу                                      |          |
|------------|----------------|---|--------------------------|-----------------------------|---|--|----------|
| h          | u <sub>h</sub> | t <sup>0</sup> – температура                        | <b>B</b>                 | Рівномірний                 | u <sub>h</sub> = √(u <sub>h</sub> <sup>2</sup> + u <sub>тем</sub> <sup>2</sup> )  | 8hm / (τ <sup>2</sup> V)                               |          |
|            |                | похибка вимірювання товщини                         | <b>B</b>                 |                             |   |  |          |
| τ          | u <sub>τ</sub> | τ – формування стробу                               | <b>A</b>                 | Сімпсона                    | u <sub>τ</sub> = √(u <sub>c</sub> <sup>2</sup> + u <sub>d</sub> <sup>2</sup> + u <sub>ξ</sub> <sup>2</sup> )                                  | - 8h <sup>2</sup> m / (τ <sup>3</sup> V)               |          |
|            |                | f <sub>д</sub> – частота дискретизації              | <b>A</b>                 |                             |   |  |          |
|            |                | ξ – випадкова похибка вимірювання часу              |                          |                             |   |  |          |
| V          | u <sub>V</sub> | t <sup>0</sup> – температура                        | <b>B</b>                 | Рівномірний                 | u <sub>δV</sub> = √(u <sub>тем</sub> <sup>2</sup> + u <sub>a</sub> <sup>2</sup> + u <sub>b</sub> <sup>2</sup> + u <sub>c</sub> <sup>2</sup> ) | - 4h <sup>2</sup> m / (τ <sup>2</sup> V <sup>2</sup> ) |          |
|            |                | похибка вимірювання геометричних розмірів           | довжина a                |                             |   |  | <b>B</b> |
|            |                |   | ширина b                 |                             |   |  |          |
| висота c   |                |   |                          |                             |   |  |          |
| ξ m        | u <sub>m</sub> | σ <sub>ξ</sub> – випадкова похибка вимірювання маси | <b>B</b>                 | Рівномірний                 | u <sub>m</sub> = √(u <sub>ξ</sub> <sup>2</sup> + u <sub>d</sub> <sup>2</sup> + u <sub>n</sub> <sup>2</sup> + u <sub>v</sub> <sup>2</sup> )    | 4h <sup>2</sup> / (τ <sup>2</sup> V)                   |          |

3. Отримання виразу для оцінювання комбінованої стандартної невизначеності.

При складанні бюджету невизначеності передбачалося, що випадкові складові невизначеності є некорельованими.

Для розглянутого прикладу отримуємо формулу

$$u_{Y^Ю} = \sqrt{\left(\frac{8hm}{\tau^2 V} u_h\right)^2 + \left(-\frac{8h^2 m}{\tau^3 V} u_\tau\right)^2 + \left(-\frac{4h^2 m}{\tau^2 V^2} u_V\right)^2 + \left(\frac{4h^2}{\tau^2 V} u_m\right)^2} \quad (2)$$

Неточність визначення маси ОК залежить від роздільної здатності вагів, калібрування, яке в свою чергу обумовлене максимальною похибкою вимірювання вагів та похибкою нелінійності, а також, випадковою похибкою вимірювання. Значення похибки вимірювання маси обирають з паспорту на ваги.

Невизначеність, обумовлена частотою дискретизації сигналів в аналого-цифровому перетворювачі (АЦП). Враховуючи рівномірний закон розподілу ймовірності цієї складової похибки її середньоквадратичне значення (СКЗ) визначається як:

$$u_{\tau} = \frac{1}{f_{\text{д}} 2\sqrt{3}},$$

де  $f_{\text{д}}$  – частота дискретизації АЦП.

Значення  $\xi$  обумовлене впливом таких факторів як температура, вологість, недосконалість апаратурної реалізації приладу, неоднорідностей матеріалу ОК. Ця складова може бути зменшена багаторазовим повторюванням вимірювань та їх статистичним опрацюванням.

Для експериментального підтвердження розробленої методики був проведений експеримент визначення модуля Юнга для сталюого зразка розмірами 2x2x10 см. Частота дискретизації 100 МГц. Невизначеність вимірювання модуля Юнга склала  $u_{\gamma_{\text{Ю}}} = 9,75 \cdot 10^9$  Па. Найбільший внесок в оцінку невизначеності вносить невизначеність, спричинена вимірюванням маси та об'єму зразка.

## ВИСНОВОК

В роботі розроблено методику оцінювання пружних констант матеріалів (модуль Юнга) на основі прецизійного вимірювання товщини досліджуваного матеріалу.

Суть прецизійного вимірювання товщини полягає у визначенні часової затримки проходження ультразвукової хвилі в матеріалі.

Значення модуля Юнга визначається розрахунковим шляхом.

В роботі подано детальний аналіз невизначеності для способу визначення модуля Юнга. Побудовано діаграму Ішикави, наведено бюджет невизначеності та проаналізовано внесок складових невизначеності в загальну невизначеність.

## Список літератури

1. Кінетика накопичення пошкоджень при повторно-змінному осьовому навантаженні та зсуві (крученні) за при прямого і зворотного режимів навантаження конструкційних матеріалів / Тези доповідей загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція "Машинобудування", підсекція "Динаміка і міцність машин" / Укладач Сидоренко Ю.М. – К: НТУУ "КПІ", 2014. – С. 3.
2. Ступин В.А. Определение упругих констант металлов ультразвуком резонансным методом / В.А. Ступин. – М.: ЦНИИАтомИнформ, 1985. – 16 с.
3. Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) : ISO/IEC Guide 98-3:2008. – [Accepted 2008-09-30]. – Geneva : ISO, 2008. – 120 p. – (International standard).
4. Ціделко В.Д. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання: моногр. / В.Д. Ціделко, Н.А. Яремчук. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2002. – 176 с.
5. Новицький П.В. Оцінка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 278 с.
6. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
7. Ультразвуковий двошкільний спосіб вимірювання товщини виробів Патент України / Єременко В.С., Куц Ю.В., Олійник Ю.А., Монченко О.В. / Патент на корисну модель №100756. Бюл. № 15, 10.08.2015 МПК G01B 17/02(2006.01) Номер заявки: u201501408 Дата подання заявки: 19.02.2015.
8. Використання ультразвукового двошкільного способу для підвищення точності вимірювання товщини виробів / О.Д. Близнюк, Ю.В. Куц, В.Ю. Куц, Ю.А. Олійник, О.В. Монченко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 7 (132). – С. 6-10.

Надійшла до редколегії 11.04.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.В. Куц, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УПРУГИХ КОНСТАНТ МАТЕРИАЛОВ

В.М. Мокиичук, Е.В. Монченко, Ю.А. Олейник

*В статье рассмотрен способ определения упругих констант материалов на основе прецизионного измерения толщины материалов и подана методика оценивания неопределенности для предложенного способа.*

**Ключевые слова:** упругие константы, модуль Юнга, ультразвуковая эхоимпульсная толщинометрия, неопределенность, объект контроля.

## METHOD OF ESTIMATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY OF THE ELASTIC CONSTANTS OF MATERIALS

V.M. Mokiychuk, O.V. Monchenko, Y.A. Oliynik

*The article is described the method of determining the elastic constants of materials based on precision measurements of the thickness of the material and a technique for estimating the uncertainty of the method is presented.*

**Keywords:** elastic constant, Young's modulus, ultrasonic thickness measurement, echo-impulse measurement method, uncertainty, test object.