

УДК 677.017

# УДОСКОНАЛЕННЯ АКУСТИЧНОГО БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ ЗІ СКЛАДНОЮ ВНУТРІШНЬОЮ СТРУКТУРОЮ

**Improvement of Acoustic  
Non-Contact Control of Materials  
with Complex Internal Structure**

**А. Зенкін**, доктор технічних наук,  
професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих  
технологій та вимірювальної техніки,  
E-mail: knutd@knutd.edu.ua  
**В. Здоренко**, доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри,  
E-mail: alzd@meta.ua  
**С. Барилко**, кандидат технічних наук,  
доцент кафедри,  
E-mail: ellen4ik@ukr.net  
**С. Лісовець**, кандидат технічних наук,  
доцент кафедри,  
E-mail: ser.lis.290171@gmail.com  
Київський національний університет технологій та дизайну

**A. Zenkin**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
Department of Computer-Integrated Technologies and  
Measuring Instruments,  
E-mail: knutd@knutd.edu.ua  
**V. Zdorenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department,  
E-mail: alzd@meta.ua  
**S. Barilko**, Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
E-mail: ellen4ik@ukr.net  
**S. Lisovets**, Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
E-mail: ser.lis.290171@gmail.com  
Kyiv National University of Technology and Design

*Розглянуто можливість визначення (оцінювання) товщини прошарку (дефекту) в матеріалах зі складною внутрішньою структурою шляхом застосування акустичного безконтактного контролю на основі виміреного значення фазового зсуву між пакетами акустичних коливань, які відбулися від «еталонного» матеріалу без прошарку (дефекту) і від «прошаркового» матеріалу з прошарком (дефектом). Запропоноване вдосконалення акустичного безконтактного контролю може бути корисним також під час контролю властивостей текстильних матеріалів.*

*In article the possibility of definition (assessment) of thickness of a layer (defect) in materials with complex internal structure is considered. It is reached by application of acoustic non-contact control on the basis of the measured value of phase shift between packages of acoustic vibrations which were reflected from «reference» material without layer (defect) and from «inter-*

*layer» material with a layer (defect). Control of «reference» material is shown in fig. 1. As it is possible to see, the coefficient of reflection of a package of acoustic vibrations in this case is defined by a formula (1). Control of «interlayer» material is shown in fig. 2. As it is also possible to see, the coefficient of reflection of a package of acoustic vibrations in this case is defined by a formula (9). Other value of coefficient of reflection is connected with additional interaction of a package of acoustic vibrations and a layer (defect). As these two coefficients of reflection have different values, between them there is a phase shift determined by a formula (18). Having values of all known parameters of material with complex internal structure, except thickness of a layer (defect), using a formula (18) and other formulas accompanying her, it is possible to define or at least to estimate thickness of a layer (defect). The offered improvement of acoustic non-contact control can be useful also at control of properties of textile materials.*

**Ключові слова:** дефект, коливання, композит, пакет, переплетення, прошарок, текстиль, тракт.  
**Keywords:** defect, oscillation, composite, packet, interlacing, interlayer, textile, path.

**Н**а сьогодні існує достатньо багато різних промислових виробів, до складу яких входять матеріали зі складною внутрішньою структурою. Класичний приклад таких матеріалів — це так звані композити. До них можна віднести волокнисті, шаруваті, дисперснозміцнені та інші види композитів. Наприклад, композитним матеріалом є звичайна клеєна фанера. Зазвичай композити складаються

із гнучкої основи (матриці), армованої наповнювачами. Варіюючи властивості гнучкої основи (матриці) і наповнювачів, можна отримувати широкий спектр матеріалів із потрібним набором властивостей.

Певним чином до матеріалів зі складною внутрішньою структурою можна віднести і текстильні матеріали — це, зокрема, тканини і трикотаж. Складність внутрішньої структури таких матеріалів пояснюється

наявністю складного переплетення ниток, параметри якого можуть змінюватися під впливом зовнішніх чинників (наприклад, механічного навантаження, температури і відносної вологості навколишнього середовища тощо). Матеріали зі складною внутрішньою структурою можуть і зазвичай мають порушення цієї структури, які зумовлені впливом різних внутрішніх і зовнішніх факторів: механічних, теплових, електричних, часових тощо. Контролювати внутрішню структуру таких матеріалів можна технічними засобами, які базуються на різних фізичних принципах: акустичному, вихрострумовому, радіохвильовому, радіаційному, електричному тощо [1—4]. Один із найбільш перспективних і застосовуваних принципів контролю — це контроль акустичний. Найбільш часто внутрішню структуру можна контролювати, зондуючи їх пакетами акустичних коливань. Порівняння випромінених і прийнятих пакетів таких коливань дозволяє робити певні висновки стосовно внутрішньої структури таких матеріалів.

Мета проведеного дослідження — вдосконалення акустичного безконтактного контролю матеріалів зі складною внутрішньою структурою. Зокрема, пропонується аналітичне описання розповсюдження акустичних сигналів, які відбилися від певних шарів багат шарового матеріалу. Особлива увага в процесі розроблення таких засобів приділялася можливості використання їх під час виробництва текстильних матеріалів, зокрема, для оперативного контролю товщини й поверхневої щільності тканин і трикотажу.

**ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ**

Тракт відбиття пакету акустичних коливань у загальному виді представлено на рис. 1.

Спочатку припустимо, що досліджуваний матеріал має однорідну внутрішню структуру. Розглянемо спочатку падіння на такий матеріал пакету акустич-



Рис. 1. Тракт відбиття пакету акустичних коливань у загальному виді

Рис. 1. Package of acoustic vibrations path of reflection in a general view

них коливань перпендикулярно до поверхні матеріалу. Під час падіння пакет акустичних коливань частково відбивається від зовнішньої поверхні матеріалу, частково проходить через матеріал і відбивається від внутрішньої поверхні матеріалу, частково проходить через матеріал і йде далі у зовнішнє середовище тощо, іншими словами, взаємодія пакету акустичних коливань з матеріалом має достатньо складний характер.

Проведений аналіз свідчить, що процес відбиття пакету акустичних коливань у такому випадку характеризується комплексним коефіцієнтом відбиття  $V_{ET}$  (позначимо його як «еталонний» коефіцієнт). Він також засвідчив, що коефіцієнт відбиття  $V_{ET}$  можна визначити у такий спосіб:

$$V_{ET} = \left( \left( \left( \operatorname{ch}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{sh}(\alpha h) \right) \cos\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right)^2 + \left( \left( \operatorname{sh}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{ch}(\alpha h) \right) \sin\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right)^2 \right) - \left( \left( \operatorname{ch}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{sh}(\alpha h) \right) \cos\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right) \times \left( \left( \left( \operatorname{ch}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{sh}(\alpha h) \right) \cos\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right)^2 + \left( \left( \operatorname{sh}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{ch}(\alpha h) \right) \sin\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right)^2 \right)^{-1} - j \left( \left( \operatorname{sh}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{ch}(\alpha h) \right) \sin\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right) \times \left( \left( \left( \operatorname{ch}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{sh}(\alpha h) \right) \cos\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right)^2 + \left( \left( \operatorname{sh}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{ch}(\alpha h) \right) \sin\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right)^2 \right)^{-1} \right), \tag{1}$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт загасання акустичних коливань у матеріалі;  $h$  — товщина матеріалу;  $Z_1$  — акустичний опір повітря;  $Z_2$  — акустичний опір матеріалу;  $c_2$  — швидкість розповсюдження акустичних коливань у матеріалі;  $\omega$  — колова частота акустичних коливань.

Оскільки коефіцієнт відбиття  $V_{ET}$  має комплексний характер, то його можна представити як суму дійсної й уявної складових:

$$V_{ET} = \operatorname{Re}(V_{ET}) + j \operatorname{Im}(V_{ET}). \tag{2}$$

Отже, модуль коефіцієнта відбиття  $|V_{ET}|$  приймає такий вид:

$$|V_{ET}| = \sqrt{\operatorname{Re}^2(V_{ET}) + \operatorname{Im}^2(V_{ET})}. \tag{3}$$

Формулу (3) з урахуванням формули (1) можна представити так:

$$|V_{\text{ET}}| = \left[ 1 + \left( 1 - \left( \text{ch}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \text{sh}(\alpha h) \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times 2 \cos\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right) \times \right. \\ \left. \times \left( \left( \text{ch}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \text{sh}(\alpha h) \right) \cos\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right)^2 + (4) \right. \\ \left. + \left( \left( \text{sh}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \text{ch}(\alpha h) \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sin\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) \right)^2 \right)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}},$$

Для більшості текстильних матеріалів виконуються умови  $\alpha \ll 1$  і  $Z_1/Z_2 \ll 1$ . Тоді формула (4) спроститься ще раз:

$$|V_{\text{ET}}| = \sqrt{1 + \frac{1 - 2 \cos\left(\frac{\omega h}{c_2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\omega h}{c_2}\right) + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} \sin\left(\frac{\omega h}{c_2}\right)\right)^2}}. \quad (5)$$

А за виконання умови  $\omega h/c_2 \ll 1$ , що також є характерним для текстильних матеріалів, можна отримати, що

$$|V_{\text{ET}}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2Z_1 c_2}{Z_2 \omega h}\right)^2}}. \quad (6)$$

Отже, вимірюючи значення  $|V_{\text{ET}}|$  і маючи значення  $Z_1, Z_2, c_2$  і  $\omega$ , із формули (6) можна легко визначити товщину матеріалу  $h$  [5].

Якщо у матеріалі зі складною внутрішньою структурою є тонкий прошарок повітря або газу (наприклад, дефект структури), то процес відбивання пакету акустичних коливань можна описати, використо-

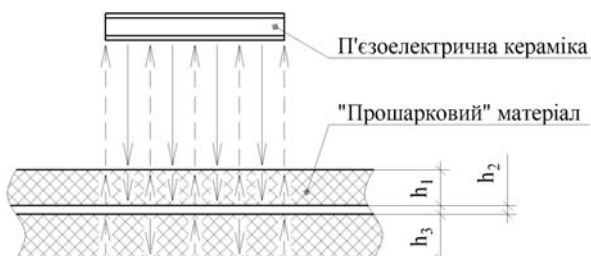


Рис. 2. Тракт відбиття пакету акустичних коливань з урахуванням прошарку повітря або газу  
Рис. 2. Package of acoustic vibrations path of reflection taking into account a layer of air or gas

вуючи вхідний акустичний опір  $Z_{\text{BX}}$  для чотирьох середовищ [6].

Тракт відбиття пакету акустичних коливань з урахуванням прошарку повітря або газу подано на рис. 2.

Проведений аналіз також засвідчив, що вхідний акустичний опір  $Z_{\text{BX}}$  можна визначити у такий спосіб:

$$Z_{\text{BX}} = (Z_1 Z_2 Z_3 - Z_1 Z_3^2 \text{tg}(K_2 h_1) \text{tg}(K_3 h_2) - \\ - Z_1 Z_3 Z_4 \text{tg}(K_2 h_1) \text{tg}(K_4 h_3) - Z_1 Z_2 Z_4 \times \\ \times \text{tg}(K_3 h_2) \text{tg}(K_4 h_3) - j(Z_2^2 Z_3 \text{tg}(K_2 h_1) + \\ + Z_2 Z_3^2 \text{tg}(K_3 h_2) + Z_2 Z_3 Z_4 \text{tg}(K_4 h_3) - Z_2^2 Z_4 \times \\ \times \text{tg}(K_2 h_1) \text{tg}(K_3 h_2) \text{tg}(K_4 h_3)) \times \\ \times (Z_2 Z_3 Z_4 - Z_2^2 Z_4 \text{tg}(K_2 h_1) \text{tg}(K_3 h_2) - \\ - Z_2^2 Z_3 \text{tg}(K_2 h_1) \text{tg}(K_4 h_3) - \\ - Z_2 Z_3^2 \text{tg}(K_3 h_2) \text{tg}(K_4 h_3) - \\ - j(Z_1 Z_3 Z_4 \text{tg}(K_2 h_1) + Z_1 Z_2 Z_4 \text{tg}(K_3 h_2) + \\ + Z_1 Z_2 Z_3 \text{tg}(K_4 h_3) - Z_1 Z_3^2 \text{tg}(K_2 h_1) \times \\ \times \text{tg}(K_3 h_2) \text{tg}(K_4 h_3)) \right)^{-1} Z_4, \quad (7)$$

де  $h_1$  — товщина матеріалу до прошарку (дефекту);  $h_2$  — товщина прошарку (дефекту);  $h_3$  — товщина матеріалу після прошарку (дефекту);  $Z_2$  — акустичний опір матеріалу до прошарку (дефекту);  $Z_3$  — акустичний опір прошарку (дефекту);  $Z_4$  — акустичний опір матеріалу після прошарку (дефекту);  $k_2$  — хвильове число для матеріалу до прошарку (дефекту);  $k_3$  — хвильове число для прошарку (дефекту);  $k_4$  — хвильове число для матеріалу після прошарку (дефекту).

Процес відбивання пакету акустичних коливань у такому випадку характеризується комплексним коефіцієнтом відбиття  $V_{\text{ПР}}$  (позначимо його як «прошарковий» коефіцієнт).

Проведений аналіз засвідчив, що коефіцієнт відбиття  $V_{\text{ПР}}$  можна визначити так:

$$V_{\text{ПР}} = \frac{Z_{\text{BX}} - Z_1}{Z_{\text{BX}} + Z_1} \quad (8)$$

або

$$V_{\text{ПР}} = \left( Z_4 (Z_2^2 Z_3 \text{tg}(k_2 h_1) + Z_2 Z_3^2 \text{tg}(k_3 h_2) + \\ + Z_2 Z_3 Z_4 \text{tg}(k_4 h_3) - Z_2^2 Z_4 \times \\ \times \text{tg}(k_2 h_1) \text{tg}(k_3 h_2) \text{tg}(k_4 h_3)) + \\ + j(Z_4 (Z_1 Z_2 Z_3 - Z_1 Z_3^2 \text{tg}(k_2 h_1) \text{tg}(k_3 h_2) - \\ - Z_1 Z_3 Z_4 \text{tg}(k_2 h_1) \text{tg}(k_4 h_3) - \\ - Z_1 Z_2 Z_4 \text{tg}(k_3 h_2) \text{tg}(k_4 h_3)) - Z_1 (Z_2 Z_3 Z_4 - \\ - Z_2^2 Z_4 \text{tg}(k_2 h_1) \text{tg}(k_3 h_2) - Z_2^2 Z_3 \text{tg}(k_2 h_1) \text{tg}(k_4 h_3) - \\ - Z_2 Z_3^2 \text{tg}(k_3 h_2) \text{tg}(k_4 h_3)) \right) - \\ (9)$$

$$\begin{aligned}
 & -Z_1(Z_1Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) + Z_1Z_2Z_4 \operatorname{tg}(k_3h_2) + \\
 & \quad + Z_1Z_2Z_3 \operatorname{tg}(k_4h_3) - \\
 & \quad - Z_1Z_3^2 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3)) \times \\
 & \quad \times (Z_4(Z_2^2Z_3 \operatorname{tg}(k_2h_1) + Z_2Z_3^2 \operatorname{tg}(k_3h_2) + \\
 & + Z_2Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_4h_3) - Z_2^2Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3)) + \\
 & \quad + j(Z_4(Z_1Z_2Z_3 - \\
 & - Z_1Z_3^2 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) - Z_1Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_4h_3) - \\
 & \quad - Z_1Z_2Z_4 \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3)) + \\
 & \quad + Z_1(Z_2Z_3Z_4 - Z_2^2Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) - \\
 & \quad - Z_2^2Z_3 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_4h_3) - \\
 & - Z_2Z_3^2 \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3)) + Z_1(Z_1Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) + \\
 & \quad + Z_1Z_2Z_4 \operatorname{tg}(k_3h_2) + Z_1Z_2Z_3 \operatorname{tg}(k_4h_3) - \\
 & \quad - Z_1Z_3^2 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3))^{-1}.
 \end{aligned}$$

Якщо прийняти, що

$$\begin{aligned}
 A = & Z_4(Z_2^2Z_3 \operatorname{tg}(k_2h_1) + Z_2Z_3^2 \operatorname{tg}(k_3h_2) + \\
 & \quad + Z_2Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_4h_3) - \\
 & \quad - Z_2^2Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3)) - \\
 & \quad - Z_1(Z_1Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) + \\
 & \quad + Z_1Z_2Z_4 \operatorname{tg}(k_3h_2) + Z_1Z_2Z_3 \operatorname{tg}(k_4h_3) - \\
 & \quad - Z_1Z_3^2 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3));
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 B = & Z_4(Z_2^2Z_3 \operatorname{tg}(k_2h_1) + Z_2Z_3^2 \operatorname{tg}(k_3h_2) + \\
 & + Z_2Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_4h_3) - Z_2^2Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3)) \\
 & + Z_1(Z_1Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) + Z_1Z_2Z_4 \operatorname{tg}(k_3h_2) + \\
 & + Z_1Z_2Z_3 \operatorname{tg}(k_4h_3) - Z_1Z_3^2 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3));
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 C = & Z_4(Z_1Z_2Z_3 - Z_1Z_3^2 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) - \\
 & \quad - Z_1Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_4h_3) - \\
 & \quad - Z_1Z_2Z_4 \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3)) - \\
 & \quad - Z_1(Z_2Z_3Z_4 - Z_2^2Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) - \\
 & \quad - Z_2^2Z_3 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_4h_3) - \\
 & \quad - Z_2Z_3^2 \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3))
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 D = & Z_4(Z_1Z_2Z_3 - Z_1Z_3^2 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) - \\
 & \quad - Z_1Z_3Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_4h_3) - \\
 & \quad - Z_1Z_2Z_4 \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3)) + \\
 & \quad + Z_1(Z_2Z_3Z_4 - Z_2^2Z_4 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_3h_2) - \\
 & - Z_2^2Z_3 \operatorname{tg}(k_2h_1) \operatorname{tg}(k_4h_3) - Z_2Z_3^2 \operatorname{tg}(k_3h_2) \operatorname{tg}(k_4h_3)),
 \end{aligned} \tag{13}$$

то формула (9) суттєво спроститься:

$$V_{\text{пр}} = \frac{A \cdot B + C \cdot D + j(B \cdot C - A \cdot D)}{B^2 + D^2}. \tag{14}$$

Звідси

$$|V_{\text{пр}}| = \sqrt{\frac{(A \cdot B + C \cdot D)^2 + (B \cdot C - A \cdot D)^2}{(B^2 + D^2)^2}}. \tag{15}$$

Фазовий зсув  $\varphi_{\text{ЕТ}}$  між акустичними коливаннями, які відповідно падають і відбиваються від «еталонного» матеріалу, можна визначити у такий спосіб:

$$\begin{aligned}
 \varphi_{\text{ЕТ}} = & \\
 = & \operatorname{arctg} \left( \left( \operatorname{sh}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{ch}(\alpha h) \right) \sin \left( \frac{\omega h}{c_2} \right) \times \right. \\
 & \times \left( \left( \operatorname{ch}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{sh}(\alpha h) \right) \cos \left( \frac{\omega h}{c_2} \right) \right)^2 + \\
 & + \left( \left( \operatorname{sh}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \times \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. \times \operatorname{ch}(\alpha h) \right) \sin \left( \frac{\omega h}{c_2} \right) \right)^2 - \\
 & \left. - \left( \operatorname{ch}(\alpha h) + \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \operatorname{sh}(\alpha h) \right) \cos \left( \frac{\omega h}{c_2} \right) \right)^{-1}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

А фазовий зсув  $\varphi_{\text{пр}}$  між акустичними коливаннями, які відповідно падають і відбиваються від «прошаркового» матеріалу, можна визначити (з урахуванням формул (10), (11), (12) і (13)) так:

$$\varphi_{\text{пр}} = \operatorname{arctg} \left( \frac{B \cdot C - A \cdot D}{A \cdot B + C \cdot D} \right). \tag{17}$$

Фазовий зсув  $\Delta\varphi$  між цими акустичними коливаннями визначається за простою формулою:


$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{ЕТ}} - \varphi_{\text{пр}}. \tag{18}$$

Отже, виміривши значення  $\Delta\varphi$  і маючи значення  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, h_1, h_3, k_2, k_3$  і  $k_4$ , з формули (18) можна визначити або хоча б оцінити значення (використовуючи, наприклад, чисельні методи) товщини прошарку (дефекту)  $h_2$  [7—10].

### ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

У результаті проведених аналітичних розрахунків отримано можливість визначення (оцінювання) товщини прошарку (дефекту) в матеріалах зі складною внутрішньою структурою шляхом застосування акустичного безконтактного контролю на основі виміреного значення фазового зсуву між пакетами акустичних коливань, які відбилися від «еталонного» матеріалу без прошарку (дефекту) і від «прошаркового» матеріалу з прошарком (дефектом). Проведені аналітичні розрахунки отримали практичне підтвердження в межах допустимої похибки в процесі дослідження текстильних матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Маєвський С.М., Бабак В.П., Щербак Л.М. Основа побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі: Навч. посібник для студ. вузів, які навчаються за спец. «Фізичні методи та прилади інтроскопії». — К.: Либідь (Maevsky S.M., Babak V.P., & Shcherbak L.M. The basis of the construction of signal analysis systems in non-destructive control: Teaching. tutorial for studio Universities studying for specials «Physical Methods and Devices for Introscopy»). — Kiev: Lybid), — 1993. — 200 с/р.
2. Лазарев М.І., Шматков Д.І. Неруйнуючий контроль технічних об'єктів у схемах: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / М.І. Лазарев, Д.І. Шматков. — Харків: УІПА (Lazarjev M.I., & Shmatkov D.I. Non-destructive control of technical objects in the schemes: A manual for students of higher educational institutions. Harkiv: UIPA), — 2012. — 162 с/р.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. — 2-е изд., испр. — М.: Машиностроение (Ermolov I.N., & Lange Ju.V. Ultrasound control. Moscow: Mechanical engineering), — 2006. — 864 с/р.
4. Неразрушающий контроль в 5 кн.: Кн. 2: Акустические методы контроля: Практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. — М.: Высш. шк. (Ermolov I.N., Aleshin N.P., & Potapov A.I. Acoustic methods of control: Pract. allowance. — Moscow: High school), — 1991. — 283 с/р.
5. Барилко С.В. Безконтактний метод виявлення дефектів в матеріалах / С.В. Барилко, В.Г. Здоренко // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: Тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (15 червня 2017 р., м. Київ) / Відп. за вип. М.А. Зенкін. — К.: КНУТД (Barilko S.V., Zdorenko V.G. Non-contact method for detecting defects in materials. — Kiev: KNUTD), — 2017. — С/Р. 124–125.
6. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. — М.: Наука (Brehovskikh L.M. Waves in layered media. — Moscow: Thescience), — 1973. — 343 с/р.
7. Пат. № 63663 Україна, МПК G01H7/00, G01N29/00. Пристрій для вимірювання часу проходження та згасання акустичних імпульсів / Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Барилко С.В.; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну. — № u201106890; заявл. 01.06.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19 (Skrupnik Ju.O., Zdorenko V.G., & Barilko S.V. Ukraine Patent № 63663).
8. Здоренко В.Г. Вимірювання товщини полімерних плівок за допомогою ультразвукового товщиноміра та дослідження його характеристик / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну (Zdorenko V.G., & Barilko S.V. Measurement of the thickness of polymer films with the aid of an ultrasonic thickness gauge and study of its characteristics. Bulletin of the Kiev National University of Technology and Design). — 2010. — № 5 (Т/В. 2). — С/Р. 47–51.
9. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії / Ю.В. Куц та ін. // Техн. діагностика и неразрушающий контроль (Kuts Yu.V. Phase method of ultrasonic thickness measurement. Technical diagnostics and non-destructive testing). — 2013. — № 1. — С/Р. 23–27.
10. Білокур І.П. Основи дефектоскопії: Підручник. — К.: Азимут-Україна (Bilokur I.P. Fundamentals of Defectoscopy: Textbook. — Kiev: Azimuth-Ukraine), — 2004. — 496 с/р. 

Отримано / received: 21.05.2018.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Н.М. Зашчепкіною (Україна).  
 Prof. N.M. Zashchepkina, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.