

УДК 531.717

М.А. ЗЕНКІН, В.Г. ЗДОРЕНКО, О.О. П'ЯТКІН

Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОХОДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛУ ЧЕРЕЗ ПОЛІМЕРНУ ПЛІВКУ ПРИ КОНТРОЛІ ЇЇ ТОВЩИНИ

Розглянуто особливості ультразвукового контролю товщини полімерних плівок безпосередньо у ході технологічного процесу. Показано, що при цьому доцільно використання імпульсного ультразвукового сигналу. Проведений аналіз та отримано вирази для амплітуди та фазового зсуву імпульсного ультразвукового сигналу при проходженні через полімерну плівку. Отримані залежності амплітудних та фазових похибок від тривалості ультразвукового імпульсу.

Ключові слова: *ультразвуковий контроль товщини, полімерна плівка, імпульсний сигнал, амплітудна та фазова похибки.*

Перспективним напрямком економії сировини та підвищення якості полімерних плівок є застосування безконтактних пристроїв, зокрема ультразвукових, для вимірювання товщини готової продукції безпосередньо у ході технологічного процесу їх виробництва. Проведений аналіз показав, що при використанні значень амплітуди та фазового зсуву ультразвукового сигналу, що пройшов через полімерну плівку, можливо визначити її товщину [1]. При цьому для підвищення потужності ультразвукового сигналу, що випромінюється, та для виключення реверберації необхідно застосування імпульсного ультразвукового сигналу. Тому необхідно провести аналіз проходження імпульсного ультразвукового сигналу скрізь полімерну плівку при контролі її товщини.

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом досліджень обрано процес проходження імпульсного ультразвукового сигналу скрізь полімерну плівку з урахуванням згасання. При вирішенні задач, поставлених у даній роботі, були використані сучасні методи теоретичних досліджень, що базуються на теорії розповсюдження ультразвукових сигналів в шаруватих середовищах, застосуванні диференційного та інтегрального обчислення.

Постановка завдання

Враховуючи доцільність урахування впливу параметрів імпульсного ультразвукового сигналу на похибку вимірювання товщини полімерних плівок, стаття присвячена аналізу проходження імпульсного ультразвукового сигналу скрізь полімерну плівку з урахуванням згасання та визначенню похибок амплітуди та фазового зсуву відносно безперервного ультразвукового сигналу в залежності від згасання та тривалості імпульсного ультразвукового сигналу.

Результати та їх обговорення

При аналізі розповсюдження імпульсного ультразвукового сигналу в середовищах розглядалися випадки проходження сигналу в безмежному середовищі із згасанням, або через тонку пластинку, згасанням в якій нехтували. Розглянемо проходження ультразвукового сигналу через полімерну плівку товщини h з акустичним опором Z_2 , який помістили в середовище з акустичним опором Z_1 . При цьому, якщо час проходження імпульсом контрольованого виробу більший за тривалість імпульсу, то проходження сигналом контрольованого виробу відповідає розповсюдженню в безмежному середовищі. При контролі плівкових виробів тривалість імпульсу перевищує час проходження імпульсом

контрольованого виробу. В цьому випадку буде відбуватися багаторазове відбиття окремих складових імпульсу від меж виробу і середовищ[2]. Ультразвуковий імпульс, що пройшов скрізь плівку може бути поданий наступним чином:

$$P_1(t') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) S(\omega) e^{j\omega t'} d\omega, \quad (1)$$

де $S(\omega)$ – спектральна щільність зондуючого імпульсу; $W(\omega)$ – комплексний коефіцієнт проходження; t' – час з урахуванням запізнювання проходження контрольованої полімерної плівки імпульсом $\left(t' = t - \frac{h}{c_2}\right)$, де c_2 – швидкість розповсюдження ультразвуку в матеріалі плівки.

Комплексний коефіцієнт проходження з урахуванням згасання може бути поданий у вигляді[2]:

$$W(\omega) = \frac{\frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \cdot e^{j\left(\frac{\omega}{c_2} + j\alpha\right)h}}{1 - \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{2j\left(\frac{\omega}{c_2} + j\alpha\right)h}}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт згасання на частоті ω , або

$$W(\omega) = (1 - R^2) \frac{e^{j\frac{\omega h}{c_2} - \alpha(\omega)h}}{1 - R^2 \cdot e^{2j\frac{\omega h}{c_2} - 2\alpha(\omega)h}} \quad (3)$$

де $R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$ – коефіцієнт відбиття від межі «контрольований виріб – середовище», $\alpha(\omega)$ – частотно-залежний коефіцієнт згасання.

Для обчислення інтегралу (1) запишемо вираз (3) у вигляді суми нескінченно спадної геометричної прогресії

$$W(\omega) = (1 - R^2) \sum_{n=0}^{\infty} R^{2n} e^{-(2n+1)\left(-j\frac{\omega h}{c_2} + \alpha(\omega)h\right)}, \quad (4)$$

Тоді сигнал, що пройшов скрізь полімерну плівку можна подати в такому виді:

$$W(\omega) = (1 - R^2) \sum_{n=0}^{\infty} R^{2n} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{-K\left(-j\frac{\omega h}{c_2} + \alpha(\omega)h\right)} e^{j\omega t'} d\omega, \quad \text{де } K = 2n + 1. \quad (5)$$

Обчислимо інтеграл який входить у вираз (5)

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{-K\left(-j\frac{\omega h}{c_2} + \alpha(\omega)h\right)} e^{j\omega t'} d\omega. \quad (6)$$

Як показали проведені дослідження, ультразвуковий імпульс має дзвіноподібну форму, при цьому звуковий тиск дорівнює $P(t) = P_0 \cdot e^{-\delta_0^2 t^2} \cdot e^{j\omega_0 t}$, де δ_0 – параметр який характеризує форму огинаючої і пов'язаний з тривалістю імпульсу τ_0 наступним співвідношенням $\delta_0 = 2 \ln \sqrt{2} / \tau_0 = 1,67 / \tau_0$, де ω_0 – частота заповнення імпульсу. Спектральна щільність такого сигналу дорівнює

$$S(\omega) = \frac{P_0 \sqrt{\pi}}{\delta_0} \cdot e^{-\left(\frac{\omega-\omega_0}{2\delta_0}\right)^2} \quad (7)$$

В загальному випадку коефіцієнт згасання можна подати у такому вигляді

$$\begin{aligned} \alpha(\omega_0) &= a\omega_0^2 + b\omega_0 + c, \quad \alpha(\omega) = a\omega^2 + b\omega + c, \\ \text{або } \alpha(\omega) &= \alpha(\omega_0) + a(\omega^2 - \omega_0^2) + b(\omega - \omega_0). \end{aligned} \quad (8)$$

Тоді

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P_0 \sqrt{\pi}}{\delta_0} e^{-\left(\frac{\omega-\omega_0}{2\delta_0}\right)^2} e^{-K\left(\left(-j\frac{\omega}{c_2} + \alpha(\omega_0) + a(\omega^2 - \omega_0^2) + b(\omega - \omega_0)\right)\right)h} e^{j\omega t'} d\omega \quad (9)$$

Змінюючи $t' + \frac{Kh}{c_2}$ на t'' і виконавши деякі перетворення, отримуємо:

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\omega-\omega_0}{2\delta_0}\right)^2 - K\alpha(\omega_0)h - Kah(\omega^2 - \omega_0^2) - Kbh(\omega - \omega_0) + j\omega t''} d\omega. \quad (10)$$

Проведемо перетворення в показнику експоненти

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{\omega-\omega_0}{2\delta_0}\right)^2 - K\alpha(\omega_0)h - Kah(\omega^2 - \omega_0^2) - Kbh(\omega - \omega_0) + j\omega t'' = \\ & = -\left(\frac{1}{4\delta_0^2} + Kah\right)\omega^2 + \left(\frac{\omega_0}{\delta_0^2} - Kbh + jt''\right)\omega - K\alpha(\omega_0)h + Kah\omega_0^2 + Kbh\omega_0. \end{aligned}$$

Скориставшись стандартним інтегралом

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-p^2 x^2 \pm qx) dx = \exp\left(\frac{q^2}{4p^2}\right) \frac{\sqrt{\pi}}{p}, \quad (11)$$

після деяких перетворень отримуємо

$$\begin{aligned} I &= \frac{P_0}{\sqrt{1+4Kah\delta_0^2}} \exp(j\omega_0 t'' - K\alpha(\omega_0)h) \times \\ &\times \exp\left(\frac{4K^2 a^2 h^2 \delta_0^2 \omega_0^2 + 4K^2 abh^2 \delta_0^2 \omega_0 + K^2 b^2 h^2 \delta_0^2 - 2Kbjt'' \delta_0^2 - \delta_0^2 t''^2 - 4j\omega_0 t'' Kah \delta_0^2}{1+4Kah\delta_0^2}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

Тоді замінивши t'' на t' сигнал, який пройшов скрізьпівку можна подати у вигляді:

$$P_1(t') = P_0(1-R^2)e^{j\omega_0 t' - \alpha(\omega_0)h} (\operatorname{Re} X + j \operatorname{Im} X), \quad (13)$$

$$\operatorname{Re} X = \sum_{\substack{n=0 \\ K=2n+1}}^{\infty} (R \cdot e^{-\alpha(\omega_0)h})^{2n} (1+4Kah\delta_0^2)^{-\frac{1}{2}} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \exp\left(\frac{4K^2 a^2 h^2 \delta_0^2 \omega_0^2 + 4K^2 abh^2 \delta_0^2 \omega_0 + K^2 b^2 h^2 \delta_0^2 - \delta_0^2 \left(t' + \frac{Kh}{c_2}\right)^2}{1+4Kah\delta_0^2}\right) \times \\ & \times \cos\left(-\frac{2Kb\delta_0^2 \left(t' + \frac{Kh}{c_2}\right) + 4Kah\delta_0^2 \omega_0 \left(t' + \frac{Kh}{c_2}\right)}{1+4Kah\delta_0^2} + \frac{K\omega_0 h}{c_2}\right), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 \operatorname{Im} X = & \sum_{\substack{n=0 \\ K=2n+1}}^{\infty} \left(R \cdot e^{-\alpha(\omega_0)h} \right)^{2n} \left(1 + 4Kah\delta_0^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \times \\
 & \times \exp \left[\frac{4K^2 a^2 h^2 \delta_0^2 \omega_0^2 + 4K^2 abh^2 \delta_0^2 \omega_0 + K^2 b^2 h^2 \delta_0^2 - \delta_0^2 \left(t' + \frac{Kh}{c_2} \right)^2}{1 + 4Kah\delta_0^2} \right] \times \\
 & \times \sin \left[- \frac{2Kb\delta_0^2 \left(t' + \frac{Kh}{c_2} \right) + 4Kah\delta_0^2 \omega_0 \left(t' + \frac{Kh}{c_2} \right) + \frac{K\omega_0 h}{c_2}}{1 + 4Kah\delta_0^2} \right].
 \end{aligned} \tag{15}$$

При цьому амплітуда огинаючої ультразвукового сигналу, що пройшов скрізь плівку і фазовий зсув можуть бути записані у виді:

$$A = (1 - R^2) e^{-\alpha(\omega_0)h} \sqrt{\operatorname{Re} X^2 + \operatorname{Im} X^2}, \quad \Delta\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} X}{\operatorname{Re} X}. \tag{16}$$

Оскільки в експерименті вимірюється дійсна частина звукового тиску, яка впливає на приймаючий перетворювач, ультразвуковий сигнал може бути поданий як:

$$\operatorname{Re} P_1(t') = P_0 (1 - R^2) e^{-\alpha(\omega_0)h} (\operatorname{Re} X \cos \omega_0 t' - \operatorname{Im} X \sin \omega_0 t'). \tag{17}$$

При $b = 0$, $c = 0$ (квадратична частотна залежності коефіцієнта згасання) були розраховані залежності амплітудних та фазових похибок в залежності від тривалості ультразвукового імпульсу при частоті ультразвукового сигналу $f = 75$ кГц при контролі ПВХ плівки ($c_2 = 1400$ м/с) товщиною 220 мкм. Тривалість ультразвукового імпульсу вибиралась в межах 2 – 32 коливання в імпульсі.

На рис. 1 наведені залежності амплітудної похибки

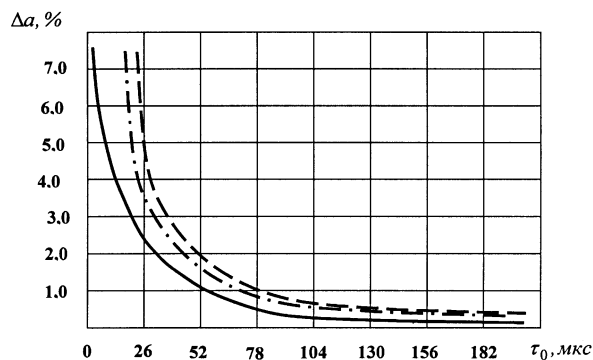
$$\Delta a = \frac{A - A_m}{A_m} \cdot 100\%,$$

де A – максимальна амплітуда огинаючої імпульсного сигналу, що пройшов скрізь плівку, A_m – амплітуда безперервного сигналу, який пройшов скрізь плівку.

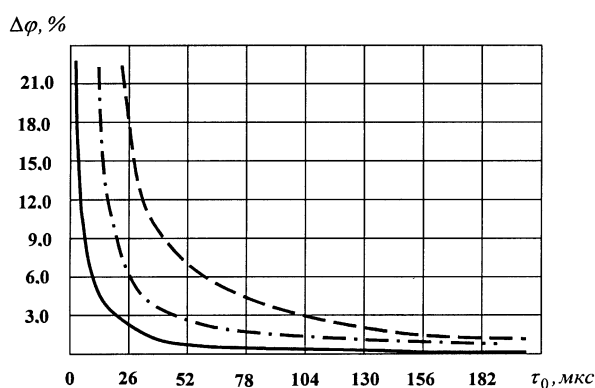
$$\text{На рис. 2 наведені залежності фазової похибки } \Delta\varphi = \frac{\varphi - \varphi_m}{\varphi_m} \cdot 100\%,$$

де φ – фазовий зсув імпульсного сигналу, який пройшов скрізь плівку, φ_m – фазовий зсув безперервного сигналу, який пройшов скрізь плівку.

Як видно з наведених залежностей вибором тривалості ультразвукового імпульсу можливе зниження як амплітудної, так і фазової похибки.

Рис.1. Залежність фазової похибки Δa від тривалості імпульсу τ_0 :

— при $\alpha = 0/m$; — при $\alpha = 5/m$; — при $\alpha = 10/m$

Рис.2. Залежність фазової похибки $\Delta \varphi$ від тривалості імпульсу τ_0 :

— при $\alpha = 0/m$; — при $\alpha = 5/m$; — при $\alpha = 10/m$

Висновки

Проведений аналіз проходження імпульсного ультразвукового сигналу скрізь полімерну плівку при контролі товщини дає можливість:

- визначити параметри ультразвукового імпульсу, який пройшов скрізь полімерну плівку з урахуванням багатократних відбиттів;
- оцінити похибку амплітуди та фазового зсуву відносно безперервного ультразвукового сигналу;
- вибрати тривалість зондуючого ультразвукового імпульсного сигналу для забезпечення заданої похибки вимірювання товщини плівки.

Список використаної літератури

1. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Вимірювання товщини полімерних плівок за допомогою ультразвукового товщиноміра та дослідження його характеристик //Вісник КНУТД. –2010. – № 5 (т. 2). – С.47 – 51.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

Стаття надійшла до редакції 01.04.2013

Исследование прохождения импульсного ультразвукового сигнала через полимерную пленку при контроле ее толщины

Зенкин Н.А., Здоренко В.Г., Пяткин А.А.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Рассмотрены особенности ультразвукового контроля толщины полимерных пленок непосредственно в ходе технологического процесса. Показано, что при этом необходимо использование импульсного ультразвукового сигнала. Проведено анализ и получены выражения для амплитуды и фазового сдвига импульсного ультразвукового сигнала при прохождении через полимерную пленку. Получены зависимости амплитудных и фазовых погрешностей в зависимости от длительности ультразвукового импульса.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль толщины, полимерная пленка, импульсный сигнал, амплитудная и фазовая погрешности.

Research of passage of a pulse ultrasonic signal through a polymeric film at the control of its thickness

N. Zenkin, V. Zdorenko, A. Pyatkin

Kiev National University of Technologies and Design

The features of the ultrasonic control of thickness polymeric пленок are considered directly during technological process. Is shown, that thus use of a pulse ultrasonic signal is necessary. The analysis is carried out and the expressions for amplitude and phase shift of a pulse ultrasonic signal are received at passage through a polymeric film. The dependences of peak and phase errors are received depending on duration of a ultrasonic pulse.

Keywords: the ultrasonic control of thickness, polymeric film, pulse signal, peak and phase error.