



УДК 621.391.83:004.94(045)

## УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Ю. В. КУЦ, Е. В. МОНЧЕНКО

*Рассмотрен способ измерения толщины слоев многослойных сред с использованием фазовой обработки сигналов. Приведены результаты моделирования процесса обработки сигналов данным способом в системе Matlab.*

*The paper deals with the method of measurement of the thickness of layers in multilayered media using phase processing of signals. Given are the results of simulation of signal processing by this methods in MatLab system.*

Одной из традиционных задач ультразвукового неразрушающего контроля (НК) является задача определения толщины объектов и изделий, стенок баллонов, работающих под высоким давлением, емкостей для хранения агрессивных жидкостей и т. п.

Эхо-импульсный метод УЗ толщинометрии предусматривает определение задержки  $\tau$ , необходимой для прохождения ультразвукового зондирующего радиоимпульсного сигнала через исследуемый объект контроля (ОК) [1]. При условии известной скорости  $c$  распространения УЗ волны в двух направлениях между поверхностью и дном ОК задержка  $\tau$  однозначно связана с толщиной  $h$  ОК:

$$h = c\tau/2. \quad (1)$$

Как правило, значение  $\tau$  оценивают по временному положению огибающих зондирующего и донного ультразвуковых сигналов, которые определяются с помощью амплитудных детекторов. В этом случае измерение толщины возможно при условии выполнения неравенства  $\tau > \tau_{и}$ , где  $\tau_{и}$  — длительность зондирующего импульса.

Измерение тонких ОК таким способом имеет некоторые ограничения, связанные с наличием мертвой зоны — участка ОК, в пределах которого становится невозможным выделение отдельно огибающих донного и зондирующего сигналов в результате их наложения. Это ограничение становится еще более жестким во время измерения толщины слоев многослойных сред.

Известно несколько способов уменьшения мертвой зоны [1, 2], среди которых можно назвать следующие:

- повышение частоты заполнения радиоимпульсных ультразвуковых зондирующих сигналов;
- использование ультразвуковых линий задержки (УЛЗ).

При практической реализации эти способы имеют определенные недостатки и ограничения.

Первый способ предусматривает повышение частоты заполнения радиоимпульса, что приводит к сокращению длительности ультразвукового импульса  $\tau_{и}$ , а значит и уменьшению мертвой зоны. Такой способ имеет следующее ограничение: с возрастанием частоты существенно увеличивается поглощение сигнала в материале ОК, соответственно ухудшается соотношение сигнал/шум. Суть второго способа объясняет рис. 1. На рисунке изображен электроакустический тракт УЗ

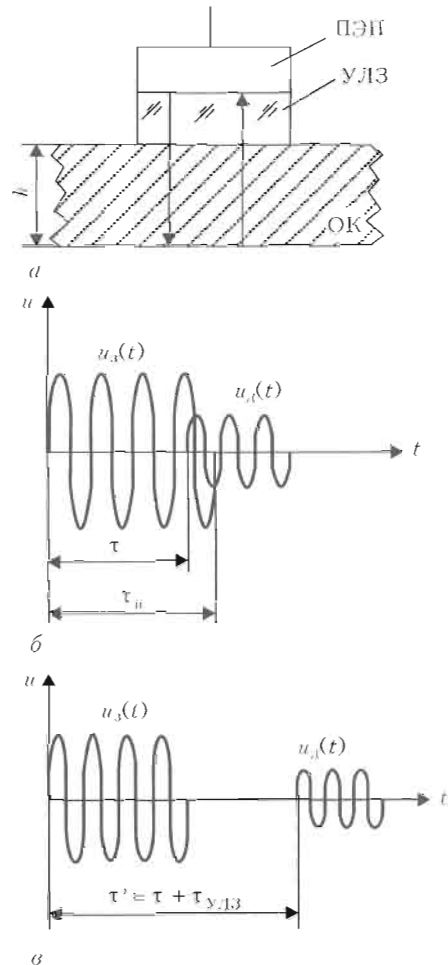


Рис. 1. Схема прозвучивания ОК с использованием УЛЗ (а); эпюры зондирующего и донного сигналов без УЛЗ (б) и с использованием УЛЗ (в)

© Ю. В. Куц, Е. В. Монченко, 2008

толщиномером с УЛЗ (рис. 1, а), включающий пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП), УЛЗ и ОК, а также эпюры зондирующего и донного импульсов при их наложении в случаях без УЛЗ (рис. 1, б) и с использованием УЛЗ (рис. 1, в).

ПЭП контактирует с ОК через акустический волновод. Его применение позволяет увеличить временной интервал  $\tau'$  между зондирующим и донным импульсом и дает возможность избежать наложения во времени этих импульсов. Поскольку время задержки сигнала в УЛЗ  $\tau_{УЛЗ}$  известно с высокой точностью, задержка определяется как  $\tau = \tau' - \tau_{УЛЗ}$ .

Такой способ позволяет убрать мертвые зоны при измерении толщин однослойных ОК, но малоэффективен при измерении толщин многослойных сред, поскольку отраженные от разных слоев ОК сигналы накладываются независимо от наличия УЛЗ.

Решение задачи контроля многослойных сред путем анализа амплитудных характеристик сигналов не позволяет надежно выделить наличие отраженного сигнала, наложенного на зондирующий. В то же время возможности применения фазовых характеристик сигналов для решения этой задачи до конца не выяснены.

Целью статьи является исследование фазовых характеристик сигналов (ФХС) УЗ толщинометрии и их использование для выявления моментов наложения зондирующего и донного сигналов (в случае тонких ОК), или двух отраженных (в случае многослойных сред).

**Постановка задачи.** Проводится измерение толщины  $h$  ОК эхо-импульсным методом при условии одностороннего доступа и применения совмещенного ПЭП. Зондирующий сигнал формируется в виде радиоимпульса

$$u_3(t) = \begin{cases} U_3 \cos 2\pi ft, & t \in [0, \tau_n], \\ 0 & t \notin [\tau_n, T_n], \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_3, f$  — соответственно амплитуда и частота синусоидального сигнала заполнения радиоимпульса;  $T_n$  — период повторения зондирующих сигналов;  $T_n \gg f^{-1}$ ;  $\tau_n$  — длительность радиоимпульса.

Значение  $\tau_n$  больше значения задержки распространения сигнала в ОК, т. е.  $\tau < \tau_n$ . Необходимо исследовать ФХС при условии наложения донного и зондирующего сигналов и определения возможности измерения сигнала в ОК по временному положению момента искажения ФХС.

**Решение поставленной задачи.** При распространении сигнала в электроакустическом тракте толщиномером происходит затухание сигнала и изменение его огибающей вследствие потерь энергии, дисперсионности материала ОК, харак-

теристик преобразователя и других факторов. Поэтому донный сигнал после его преобразования в электрический в общем виде можно представить как

$$u_3(t) = \begin{cases} U_d(t) \cos 2\pi f(t - \tau), & t \in [\tau, \tau_n + \tau], \\ 0 & t \notin [\tau, \tau_n + \tau], \end{cases} \quad (3)$$

где  $U_d(t)$  — огибающая донного сигнала.

Принятый сигнал (без учета действия шумов измерительного канала) представляет собой аддитивную смесь зондирующего и донного сигналов:

$$u_n(t) = u_3(t) + u_d(t), \quad t \in [0, T_n]. \quad (4)$$

Поскольку из условий задачи частоты сигналов заполнения  $u_3(t)$  и  $u_d(t)$  совпадают, а  $\tau < \tau_n$ , это не позволяет применить методы временной или частотной селекции для выделения донного сигнала. Вместе с этим наложение сигналов  $u_3(t)$  и  $u_d(t)$  приводит к изменению ФХС  $u_n(t)$  относительно ФХС зондирующего сигнала, которая представляется выражением

$$\Phi(t) = \begin{cases} 2\pi ft, & t \in [0, \tau_n], \\ 2\pi f\tau_n, & t \notin [\tau_n, T_n]. \end{cases} \quad (5)$$

Определим ФХС с помощью преобразования Гильберта [3]. Рассмотрим более детально понятие ФХС и особенности ее определения.

ФХС вводится на основе использования аналитического сигнала  $\hat{z}(t)$ , который представляет собой комплекснозначную функцию действительной переменной, действительная часть которой совпадает с  $u_n(t)$ , а мнимая является гильберт-образом этого сигнала [4]. Для действительной функции  $u(t)$ ,  $t \in (-\infty, \infty)$  имеем

$$\hat{z}(t) = u(t) + j\hat{u}(t), \quad (6)$$

$$\hat{u}(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{u(t+\tau) - u(t-\tau)}{\tau} d\tau. \quad (7)$$

Применение аналитического сигнала позволяет однозначно определить огибающую и ФХС  $u(t)$ :

$$\tilde{U}(t) = \sqrt{u^2(t) + \hat{u}^2(t)}, \quad (8)$$

$$\tilde{\Phi}(t) = \text{arctg} \frac{\hat{u}(t)}{u(t)} + \mathbf{K} [u(t), \hat{u}(t)], \quad (9)$$

где  $\mathbf{K}$  — оператор, устраняющий скачки фазы в точках перехода через границы интервалов  $\left[ \frac{\pi}{2n}, \frac{\pi}{2n} \right]$ ;  $n = 1, 2, \dots$ . При наложении зондирующего и донного импульсов происходит искажение ФХС, которое заключается в отличии фа-

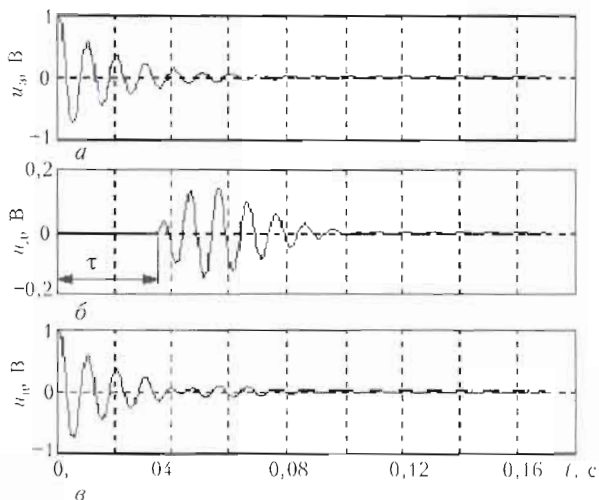


Рис. 2. Графики, иллюстрирующие формирование анализируемого радиоимпульсного сигнала: а — зондирующий  $u_3(t)$ ; б — донный  $u_d(t)$ ; аддитивная смесь зондирующего и донного сигналов  $u_n(t)$

звой характеристики такого сигнала от фазовой характеристики зондирующего сигнала.

Сущность предложенного способа ультразвуковой толщинометрии [5] состоит в анализе ФХС и определении момента ее искажения. Если используется радиоимпульсный зондирующий сигнал с гармонической несущей, фазовая характеристика неискаженного сигнала является линейной функцией времени (на интервале  $(0, \tau_n)$ ) вида (5). При совмещении во времени донного и зондирующего сигналов фазовая характеристика суммарного сигнала будет иметь скачок в пределах  $\pm\pi$ . Выявление этого скачка и определение его временного положения позволяет оценить задержку распространения ультразвукового сигнала в ОК. Скачок фазы оценивается по функции  $\delta\Phi(t)$ :

$$\delta\Phi(t) = \tilde{\Phi}(t) - \Phi(t). \quad (10)$$

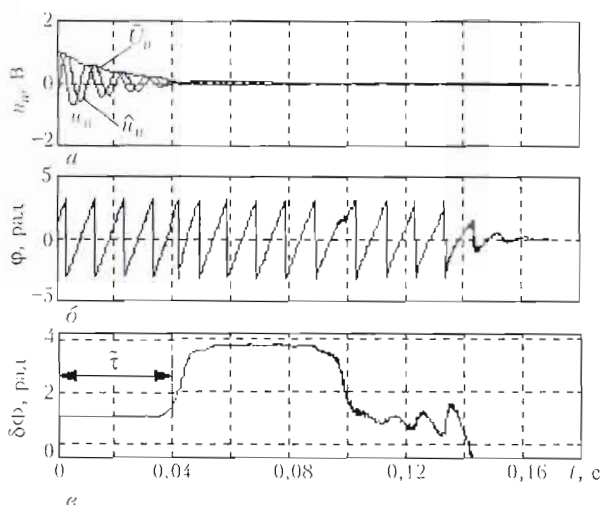


Рис. 3. Графики функций  $U_n(t)$ ,  $\hat{u}_n(t)$ ,  $u_n(t)$  (а),  $\varphi(t)$  (б) и  $\delta\Phi(t)$  (в)

**Моделирование.** С целью определения толщины слоев многослойных изделий и сред в условиях наложения излученных и отраженных импульсов данным способом было проведено моделирование в системе MATLAB.

Зондирующий сигнал формировался как радиоимпульс с экспоненциальной огибающей вида

$$u_3(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{п.в.}}\right) \cos(2\pi ft), \quad (11)$$

где  $\tau_{п.в.} = 0,02$  с — постоянная времени;  $t = lT_d$ ;  $T_d = 100$  мкс — период дискретизации;  $l = 1,1700$ ;  $f = 100$  Гц;  $A_1 = 1$  В.

Выборочные значения сигнала  $u_3(t)$  изображены на рис. 2, а. На сигнал  $u_3(t)$  накладывается отраженный сигнал  $u_d(t)$ , который имеет такую же частоту заполнения, но другую огибающую. Момент формирования  $u_d(t)$  задержан во времени относительно  $u_3(t)$  на величину  $\tau$ :

$$u_d(t) = A' \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau}\right) \cos[2\pi f(t-\tau)] \times \sin[14\pi(t-\tau)], \quad (12)$$

где  $A' = 0,5$  В;  $\tau = 0,035$  с.

График функции  $u_d(t)$  изображен на рис. 2, б.

На рис. 2, в изображена суперпозиция сигналов  $u_3(t)$  и  $u_d(t)$ , т. е.  $u_n(t) = u_3(t) + u_d(t)$ . Огибающая сигнала  $u_n(t)$  мало отличается от огибающей зондирующего, что не позволяет использовать ее для толщинометрии.

Применим к сигналу  $u_n(t)$  преобразование Гильберта. Результаты расчета гильберт-образа  $\hat{u}_n(t)$  и его огибающей  $\tilde{U}_n(t)$  изображены на рис. 3, а. Из графика видно, что ни огибающая, ни гильберт-образ  $\hat{u}_n(t)$  не позволяют сделать вывод о наличии или отсутствии донного сигнала.

Проанализируем ФХС сигнала  $u_n(t)$ . На рис. 3, б изображена дробная часть ФХС,  $\varphi(t) \in (-\pi, \pi)$ . Полученные значения  $\varphi(t)$  используются для определения функции  $\Phi(t)$  по формуле (9) и вычисления скачка фазы  $\delta\Phi(t)$  в соответствии с (10).

Результаты расчетов показаны на рис. 3, в. Из графика видно, что на интервале  $t \in (0,035; 0,045)$  с фаза скачкообразно изменяется на величину  $\sim 1,5$  рад. Временное положение скачка фазы соответствует моменту прихода донного импульса. Таким образом, определяя временное положение скачка фазы относительно зондирующего сигнала, можно определить  $\tilde{\tau}$  — оценку времени распространения ультразвукового сигнала в ОК. Неизвестная толщина ОК рассчитывается по формуле (1).

### Выводы

Рассмотрен способ определения толщины стенок тонкостенных ОК при одностороннем доступе.

Способ основан на анализе фазовых характеристик сигналов эхо-импульсной толщинометрии.

Предложенный способ позволяет исследовать многослойные объекты с плоскопараллельными слоями, поскольку каждый слой, отличающийся акустическими свойствами, порождает отраженный сигнал, который даже в случае наложения на донный или другой зондирующий сигналы будет искажать ФХС принятого сигнала. Временное положение момента искажения фазовой характеристики принятого сигнала позволяет определить задержку  $\tau$  и, соответственно, толщину слоя  $h$ .

Представлены результаты моделирования сигналов эхо-импульсной толщинометрии для данной

задачи, которые подтверждают работоспособность предложенного способа.

1. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.
2. Королев М. В. Безэталонные ультразвуковые толщиномеры. — М.: Машиностроение, 1985. — 80 с.
3. Куц Ю. В., Щербак Л. М. Застосування перетворення Гільберта у фазометрії // Технологічні системи. — 2004. — № 2. — С. 50–55.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных // Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 540 с.
5. Пат. України на корисну модель № 18441. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини багатопшарових матеріалів та виробів / В. С. Сременко, Ю. В. Куц, О. В. Мюнченко. — Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11, 2006.

Нац. авиац. ун-т України,  
Київ

Поступила в редакцію  
09.10.2007



Международная специализированная выставка  
измерительной техники и автоматики "МЕРА-2008"  
15–17 апреля 2008 года  
ЦВК «Экспоцентр», павильон 7



## МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И АВТОМАТИКИ «МЕРА-2008»

15–17 апреля 2008 года ЦВК «Экспоцентр», Москва

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии совместно с Международным научно-техническим обществом приборостроителей и метрологов и ЗАО «Евроэкспо» 15–17 апреля 2008 г. проводит 14-ю Международную выставку МЕРА-2008 в Экспоцентре на Красной Пресне, г. Москва.

Выставка МЕРА-2008 проводится как официальное мероприятие Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии по плану Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации.

МЕРА-2008 проводится одновременно с выставкой «Трубопроводный транспорт» и состав ее экспозиции будет отражать интересы и особенности обеспечения этого промышленного комплекса современной измерительной техникой и автоматикой.

### Тематика выставки:

1. Измерительные приборы и системы
2. Приборы и системы для испытания строительных материалов
3. Измерительные информационные системы и их элементы

По вопросам участия и за дополнительной информацией обращаться:

тел.: +7495 925 6561/62, [mera@meraexpo.ru](mailto:mera@meraexpo.ru);

тел.: +7495 202 6571, [kavalerov@mail.ru](mailto:kavalerov@mail.ru)

Сайт выставки: [www.meraexpo.ru](http://www.meraexpo.ru)