

УДК 621.316

И.В. Руженцев<sup>1</sup>, А.В. Марченко<sup>2</sup><sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники<sup>2</sup>ГП «Харьковстандартметрология»

## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЯ И СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

*Получены выражения для оценки неопределенности измерения толщины изделий и скорости распространения ультразвуковых колебаний (УЗК), которые могут быть использованы при конструировании высокоточных ультразвуковых толщиномеров и эталонных установок для измерения скорости УЗК, использующих способ спектральной обработки автокорреляционной функции (АКФ).*

*неопределенность измерения толщины изделий, скорость распространения УЗК*

### Введение

В настоящее время наибольшее распространение в качестве средств бесконтактного излучения и приема ультразвуковых волн получили электромагнитно-акустические (ЭМА) приборы [1]. Особое внимание в этом направлении уделяется вопросам ЭМА толщинометрии. К основным недостаткам ЭМА толщиномеров надо отнести их низкую чувствительность по сравнению с пьезопреобразователем при контроле иммерсионным способом и низкую точность измерения толщины изделий.

В ряде работ сделаны успешные попытки повышения чувствительности ЭМА приборов путем определения взаимокорреляционной функции. Однако, при малых отношениях сигнал/шум данный способ имеет значительную погрешность и требует применения специальных процедур для определения локальных максимумов корреляционной функции.

Предельно достижимая точность измерения толщины ЭМА методом в условиях значительных акустических помех может быть существенно повышена при использовании спектральной обработки автокорреляционной функции (АКФ).

Цель работы – априори оценить неопределенность измерений толщины изделий и скорости распространения УЗК при спектральной обработке АКФ.

### Оценка неопределенности измерения

Уравнение измерения толщины изделия при спектральной обработке АКФ имеет вид

$$h = \frac{T_a c}{2} = \frac{c}{2f}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость распространения УЗК в изделии;  $T_a$  – период АКФ;  $f$  – частота следования радиоимпульсов АКФ.

При указанном способе обработки для косвенного измерения  $h$  непосредственно определяют частоту следования донных радиоимпульсов  $f$ . Кроме того, суммарная неопределенность зависит от точно-

сти определения скорости распространения упругих колебаний в изделии. Скорость ( $c$ ) определяется при настройке прибора с помощью стандартного образца, выполненного из того же материала, что и изделие, подвергаемое контролю, и имеющего известную с высокой точностью (расширенная неопределенность, как правило, не превышает 10 мкм) толщину  $h_s$

$$c = 2h_s f_s, \quad (2)$$

где  $f_s$  – частота следования радиоимпульсов АКФ при измерении толщины стандартного образца.

В том случае, когда измеряемая величина  $Y$  функционально зависит от целого ряда входных величин  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , говорят о суммарной стандартной неопределенности.

Оценку измеряемой величины  $Y$  обозначим через  $y$ , а оценки  $X_1, X_2, \dots, X_n$  через  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Таким образом, выходная оценка  $y$ , являющаяся результатом измерения, выражается следующим образом:

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3)$$

В нашем случае функциональная зависимость определяется уравнением (1).

Поскольку входные величины определяются в независимых экспериментах, то считаем их некоррелированными. При этом суммарная стандартная неопределенность  $u_c(y)$  представляет собой положительный квадратный корень из суммарной дисперсии  $u_c^2(y)$ , полученной из формулы:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (4)$$

где  $\varphi$  – функция, приведенная в уравнении (3);  $u(x_i)$  – стандартная неопределенность входной оценки  $x_i$ .

Таким образом, суммарная стандартная неопределенность измерения толщины изделий способом спектральной обработки АКФ определяется как

$$u_c(\tilde{h}) = \sqrt{\left( \frac{c}{2f^2} u_B(\tilde{f}) \right)^2 + \left( \frac{1}{2f} u_c(\tilde{c}) \right)^2}, \quad (5)$$

где  $u_B(\tilde{f})$  – стандартная неопределенность измерения частоты следования радиоимпульсов АКФ;  $u_c(\tilde{c})$  – суммарная стандартная неопределенность измерения скорости распространения УЗК.

Неопределенность измерения  $f$  при спектральной обработке АКФ связана с дискретизацией в частотной области и подчиняется закону Симпсона (представляет собой сумму двух случайных погрешностей, распределенных по закону равномерной плотности). Поэтому стандартная неопределенность измерения частоты следования радиоимпульсов АКФ  $f$ , рассчитанная по типу В, определяется как

$$u_B(\tilde{f}) = \Delta f / \sqrt{6}. \quad (6)$$

Оценка (с) является также результатом косвенного измерения (2).

Суммарная стандартная неопределенность измерения скорости распространения УЗК

$$u_c(\tilde{c}) = \sqrt{\left(\frac{1}{k} 2h_s u_B(\tilde{f}_s)\right)^2 + \left(2f_s u_B(\tilde{h}_s)\right)^2}, \quad (7)$$

где  $u_B(\tilde{f}_s)$  – стандартная неопределенность оценки  $f_s$ , рассчитанная по типу В;  $u_B(\tilde{h}_s)$  – стандартная неопределенность оценки  $h_s$ , рассчитанная по типу В.

Таким образом, с учетом усреднения частотных интервалов дискретного спектра АКФ (частотный интервал между соседними спектральными пиками определяется делением интервала между крайними спектральными пиками на число интервалов в главном лепестке спектра), подставляя формулы (6) и (7) в (5), получим выражения для оценки суммарной стандартной неопределенности измерения толщины изделий

$$u_c(\tilde{h}) = \sqrt{\left(\frac{c}{2kf^2 \sqrt{6}}\right)^2 + \left(\frac{1}{f^2} \left(\frac{1}{k} h_s u_B(\tilde{f}_s)\right)^2 + \left(f_s u_B(\tilde{h}_s)\right)^2\right)}.$$

Расширенная неопределенность измерения толщины изделий определяют по формуле:

$$U_h = t \cdot u_c(\tilde{h}), \quad (9)$$

где  $t$  – коэффициент охвата для заданного уровня доверия  $P$  при допущении нормального распределения.

Расширенную неопределенность измерения скорости распространения УЗК определяют аналогично:

$$U_c = t \cdot u_c(\tilde{c}). \quad (10)$$

## Выводы

Полученные выражения для оценки неопределенности измерения толщины изделий и скорости распространения УЗК могут быть использованы при конструировании высокоточных ультразвуковых толщиномеров и эталонных установок для измерения скорости УЗК, использующих способ спектральной обработки АКФ.

Легко показать, что полученные оценки расширенной неопределенности измерения, как толщины изделия, так и скорости распространения УЗК, полностью соответствуют оценкам доверительных границ случайных погрешностей результатов косвенных измерений. Поэтому выбор пути оценки качества измерений (теории погрешности или концепции «неопределенности») зависит исключительно от технических основ метрологического обеспечения разрабатываемых средств неразрушающего контроля в той стране, где эти средства будут использоваться.

## Список литературы

1. Сучков Г. М. О главном преимуществе ЭМА-способа // Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 67-70.

Поступила в редколлегию 30.05.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет внутренних дел, Харьков.