

СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

УДК 620.179:534.6

В.П. Бабак, С.Ф. Филоненко, М. Кришан

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена цифровая обработка сигналов при определении акустических свойств материалов.

С понятием ультразвука связаны целые области современной физики, промышленной технологии, информационно-измерительной техники, биологии, медицины, механики и т.д. В современных технологиях широко применяются методы исследований и методы неразрушающего контроля (НК) на основе ультразвуковых колебаний. Исследования материалов и происходящих в них процессов базируются на связи характера распространения ультразвуковых колебаний со структурой веществ и элементарными возбуждениями в них. На основании проведения измерений скорости и поглощения звука (коэффициента затухания) в зависимости от частоты, а также разнообразных внешних факторов, таких как: давление, температура, магнитное поле, механическая нагрузка и другие, - получают информацию о физико-механических характеристиках материалов. Кроме того, значения измеренных параметров являются фундаментом не только при проектировании и проведении расчетов изделий и конструкций на надежность, но и при их контроле. Точность или достоверность проводимых расчетов в значительной степени зависит от точности определения характеристик материалов, важнейшими из которых являются скорость звука и коэффициент затухания. Это относится не только к области низких, но особенно к области высоких температур, где наблюдается значительное затухание сигналов, а сам процесс измерения достаточно трудоемок и требует значительных временных затрат.

При определении коэффициента затухания, как правило, получают амплитудную или частотную его зависимости. В то же время определение зависимости коэффициента затухания от температуры представляет еще больший интерес. Однако экспериментальные сложности таких измерений достаточно велики не только с технической, но и с методической точек зрения. Поэтому температурные зависимости коэффициента затухания в широком диапазоне температур встречаются редко. Одной из методик измерения коэффициента затухания в широком диапазоне температур является методика, рассмотренная в работе [1]. В качестве образцов для проведения измерений используются проволочные стержневые образцы с проточкой. После ввода в образец зондирующего импульса производят измерение амплитуд сигналов, отраженных от проточки и от торца образца, коэффициент затухания определяется из выражения

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\beta^2}{(1-\beta^2)^2} e^{3\alpha\ell}, \quad (1)$$

где E_1, E_2 – соответственно энергия сигналов, отраженных от проточки и от торца образца; β – полный коэффициент отражения от проточки; ℓ – длина рабочего участка образца.

При измерении максимальной амплитуды сигнала энергия в выражении (1) определяется как квадрат амплитуды.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\beta}{1-\beta^2} e^{2\alpha t}, \quad (2)$$

где U_1, U_2 – соответственно амплитуда сигналов, отраженных от проточки и от торца образца.

Вместе с тем, как отмечают авторы работы, разработанная методика предъявляет жесткие требования не только к геометрии образца, но и к генерации несущего сигнала. Генератор радиоимпульсов должен обеспечивать качественное заполнение видеоимпульсов, особенно вблизи заднего и переднего его фронтов иначе невозможно идентифицировать пики внутри пакета отраженных сигналов.

Повышение точности измерения с использованием расчетного соотношения (2) возможно за счет методики автоматизации самого процесса измерения на базе персонального компьютера с применением статистической обработки данных по результатам многократных цифровых измерений. Компьютерная система реализована на технологии «PCLabCard», предназначенной для построения миниизмерительных лабораторий (см. работы [4, 5]). Использование структурно-алгоритмического подхода в построении системы с определенным ее конфигурированием, принятым структурированием информации, измерением и передачей данных в процессор через порт ввода-вывода позволяет повысить точность измерений. При этом разрешающая способность по времени

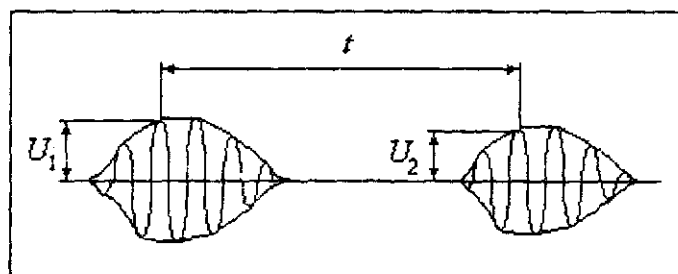


Рис.3. Измерение амплитуд и временного расстояния между отраженными сигналами

повышается за счет наличия скоростных счетчиков (возможное количество разрядов 20 и выше). Установка напряжений на выходе внешних устройств, осуществляемая по пороговым уровням, возможна с использованием скоростных пиковых устройств, а измерение установленных значений производится с числом разрядов 12, 14 или 16 (в зависимости от типа используемого порта ввода-вывода), что обеспечивает повышение разрешающей способности и точности по напряжению. Кроме того, дополнительное повышение точности измерений обеспечивается за счет проведения статистической обработки результатов многократных измерений [6]. При временном расстоянии между отраженными импульсами порядка 20 мкс, интервале дискретизации аналого-цифрового преобразователя 10 мкс, инерционности датчика температуры не выше 10 мс, возможно проведение 500 измерений по акустическому каналу. Если проводить измерение каждой второй серии отраженных импульсов, то количество измерений снижается до 250, что является достаточным условием статистики результатов многократных измерений.

Несмотря на полную автоматизацию, существуют проблемы методического плана, связанные с искажением отраженного сигнала, что рассматривалось ранее. Значительные искажения наблюдаются на высоких температурах, когда из-за большого затухания достаточно трудно различить пики внутри пакета отраженных сигналов. В то же время наиболее емким параметром (как с точки зрения обработки сигналов, так и с точки зрения

определения коэффициента затухания) является энергия сигналов, которая учитывает "тонкую структуру" сигнала. Однако ее измерение представляет определенные сложности. Поэтому в существующих методиках используется измерение наиболее простого параметра – амплитуд отраженных сигналов. Вместе с тем современные порты ввода-вывода позволяют проводить ввод аналоговых сигналов с высокой частотой дискретизации (более 10 МГц) без потери в разрешающей способности и точности измерений, т.е. осуществлять ввод в ПК истинных отраженных сигналов с последующей их обработкой. При этом основная нагрузка ложится на программное математическое обеспечение, которое оперирует только с цифровыми данными.

Сигналы, регистрируемые на выходе датчика, представляют собой радиоимпульсы. В общем случае можно записать [6]:

$$U_p(t) = U_b(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где $U_p(t)$ – радиоимпульс; $U_b(t)$ – видеоимпульс (оггибающая радиоимпульса); ω_0 – частота; φ_0 – начальная фаза.

Фактически, радиоимпульс $U_p(t)$ рассматривается в виде произведения некоторого видеоимпульса $U_b(t)$, играющего роль оггибающей, и неинтегрированного гармонического колебания. Полная математическая модель, учитывающая подробности "тонкой структуры" импульса, достаточно сложна, поэтому при анализе импульсов используются числовые параметры, дающие упрощенное представление о его форме. Норма сигнала определяется по выражению

$$\|U(t)\| = \sqrt{\int_0^{\tau} U^2(t) dt},$$

что позволяет вычислять энергию сигнала

$$E = \|U(t)\|^2.$$

Если измерение и обработка осуществляется в цифровом виде с использованием ПК, то для сигнала длительностью τ можно записать:

$$E = \Delta t \Delta U^2 \sum_i^n (A_i)^2, \quad 0 < t \leq \tau, \quad (3)$$

где E и τ – энергия и длительность сигнала; Δt – временной интервал дискретизации сигналов ($\Delta t = \text{const}$); ΔU – цена деления разряда аналого-цифрового преобразователя (входная чувствительность $\Delta U = \text{const}$); A_i – число разрядов аналого-цифрового преобразователя для i -го отсчета амплитуды сигнала в машинных отсчетах.

Подставив выражение (3) в формулу (1) и проведя соответствующие преобразования, с учетом индексации сигналов, получим

$$\frac{\sum_i^n (A_{1i})^2}{\sum_j^m (A_{2j})^2} = \frac{\beta^2}{(1 - \beta^2)^2} e^{4\alpha t}, \quad (4)$$

где A_{1i} , A_{2j} – число разрядов аналого-цифрового преобразователя для i -го и j -го отсчетов амплитуд первого и второго отраженных сигналов в машинных отсчетах при постоянном значении временного интервала дискретизации (Δt) и цены деления разряда аналого-цифрового преобразователя (ΔU).

Вместе с тем, как отмечено в работе [2], при использовании традиционного импульсного метода отраженный эхо-сигнал имеет сложную форму. Момент прихода или «вступления» импульса на оси времени зависит от крутизны фронта, длительности импульса, частоты и т.д. Если отсутствует дисперсия звука, то момент вступления зондирующего импульса и импульса, прошедшего через материал, совпадают, а при наличии дисперсии точное положение прошедшего импульса на оси времени не определено (рис.1). Следовательно, не определено и положение соответствующих максимумов, что может приводить к значительным ошибкам. Для уменьшения последних целесообразно разделить сигнал на зоны (рис.2). Зоны 1, 2 – зоны вступления сигнала с нестабильным положением фронта. Зона 3 – зона устойчивых, имеющих стабильное положение на временной оси, фронтов сигналов.

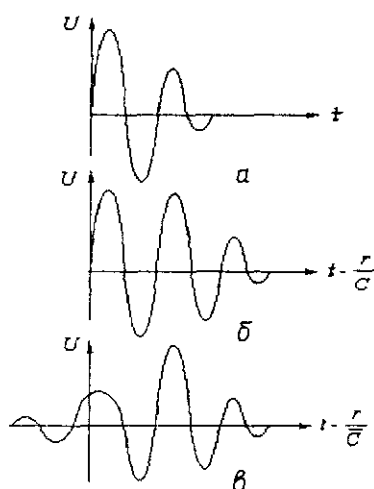


Рис.1. Диаграммы акустических импульсов: *a* – зондирующий; *б* – прошедший через материал без дисперсии; *в* – прошедший через материал с дисперсией (*r* – расстояние, проходимое ультразвуковым импульсом через материал); *C* – скорость ультразвуковых колебаний при отсутствии дисперсии звука; \bar{C} – средняя скорость ультразвуковых колебаний при наличии дисперсии звука

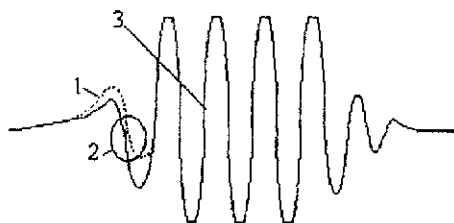


Рис.2. Осцилляции принятого импульса, ограниченного приемным трактом

Подобный подход использован в работе [3], где с целью повышения точности измерения возбуждение осуществляют радиоимпульсами, а принятый сигнал не подвергают детектированию. Тогда появляется возможность визуально различить заполняющие импульсы несущей частоты внутри пакета на экране осциллографа, а измерения амплитуд и временного расстояния проводить в соответствии с рис.3. При этом расчетное соотношение имеет вид:

В случае искажения отраженных сигналов или при невозможности различения пиков внутри пакета, когда сложно провести измерение амплитуд сигналов для выполнения расчетов по выражению (2), справедливым остается соотношение (4). Для постоянной чувствительности и интервала дискретизации работа сводится к оперированию только с машинными отсчетами без поиска пика амплитуды одной из осцилляций, что позволяет более корректно определять значение коэффициента затухания.

При определении скорости звука измеряемым параметром является временное расстояние между отраженными сигналами. Искажения последних могут быть вызваны, прежде всего, влиянием структурных параметров материала, что приводит к ошибкам отсчета временного интервала (рассмотрено ранее). Использование измерений энергии позволяет снизить данные ошибки, если временные отсчеты фиксировать по энергетическим центрам тяжести, которые всегда однозначно определены, независимо от искажения формы регистрируемых сигналов. Положение центра тяжести во временной координате при постоянной чувствительности и интервала дискретизации определяется по выражению

$$t_{\text{цт}} = \frac{\sum_{i=0}^n t_i (A_i)^2}{\sum_{i=0}^n (A_i)^2}, \quad (5)$$

где A_i – амплитуда сигнала в момент времени t_i .

Знаменатель выражения (5) является энергией сигнала. При фиксации двух отраженных сигналов производится определение центров тяжести для каждого из них, а временное расстояние между сигналами определяется по выражению

$$t = t_{\text{цт2}} - t_{\text{цт1}},$$

где $t_{\text{цт1}}$, $t_{\text{цт2}}$ – соответственно, положение центров тяжести второго и первого отраженных сигналов.

Если искажение сигнала отсутствует, то его положение центра тяжести совпадает с медианой. Если сигнал имеет искажения, то будет происходить смещение центра тяжести. При этом его положение всегда привязано к сигналу и однозначно определено.

Список литературы

1. *Gobran N.K., Youssef H.* New method for the measurement of ultrasonic attenuation in solids at high temperatures // *J. Acoust. Soc. Amer.* –39, 1966. –№ 6. –Р. 1120–1124.
2. *Импульсный метод измерения скорости ультразвука /Г.А.Буденков, В.А.Стрижак, А.В.Пряхин и др.// Дефектоскопия. –1998. –№ 9. –С.3–8.*
3. *Семашко Н.А., Роцупкин В.В., Ляховицкий М.М.* Установка и метод для исследования акустических свойств и процессов рекристаллизации в металлах // *Заводская лаборатория. – Т 53, 1987. –№ 8. –С.58–61.*
4. *Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Кришан М.* Об измерении акустических свойств материалов // *Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы, –1998. –№2. –С. 84 – 87.*
5. *Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Кришан М.* Формирование информации в компьютерной системе измерения акустических свойств материалов // *Вісник КМУЦА. –1999. –№ 1. –С.169-173.*
6. *Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е.* Обробка сигналів.-К.: Либідь, 1996.-392 с.