



УДК 620.179.16

© В. Н. Овчарук, Чье Ен Ун, 2007

АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИЗУЧЕНИИ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Овчарук В. Н. – доц. кафедры «Автоматика и системотехника», канд. техн. наук; *Чье Ен Ун* – завкафедрой «Автоматика и системотехника», д-р техн. наук, проф. (ТОГУ)

В работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований амплитудно-частотных характеристик образцов керамических материалов. Рассматриваются возможные варианты по снижению флуктуационной погрешности при спектральном анализе сигналов акустической эмиссии. Приводится рекомендуемая методика корректировки и обработки спектральных функций акустических сигналов, полученных при статических испытаниях образцов керамических материалов.

The work submits the results of theoretical and experimental research of frequency characteristics of ceramic materials. Possible variants on decreasing errors are considered under the spectral analysis of acoustic emission signals. The technique of updating and processing of spectral functions of the acoustic signals obtained under static testing is recommended.

Введение

В связи с постоянным усложнением промышленных изделий, широким применением новых материалов и технологий, работой узлов и агрегатов в режимах, близких к предельным, резко возрастают требования обеспечения технической надежности и эксплуатационной безопасности. При этом весьма актуально стоит задача диагностики состояния изделия и конструкций. Подробный анализ, проделанный в работе [1, с. 1–4], показал, что перспективным путем решения этой задачи следует признать метод акустической эмиссии (АЭ). Данный метод обладает более высокой чувствительностью по сравнению с другими методами, что позволяет обнаруживать дефекты структуры



материала на уровне скопления дислокаций. При этом анализируются только развивающиеся, т. е. наиболее опасные с точки зрения снижения прочностных свойств изделия, дефекты. Он позволяет сравнительно простыми средствами организовать непрерывный оперативный контроль с выдачей результатов в реальном масштабе времени. Однако практическое применение метода АЭ для решения задач технической диагностики сопряжено с определенными трудностями.

Распространяющийся в объекте акустический сигнал претерпевает существенные искажения в результате воздействия системы «объект-преобразователь». Эти искажения настолько значительны [2–4], что практически не представляется возможным восстановить истинную форму исходного сигнала. По этой причине параметры АЭ, как правило, определяются путем обработки электрического сигнала с выхода приемного преобразователя, что, при отсутствии удовлетворительных моделей процесса разрушения, не позволяет установить четких связей между параметрами состояния конструкции и характеристиками акустических сигналов. При этом возникающие в процессе испытаний и эксплуатации акустические шумы и помехи также распространяются в объекте и воздействуют на входные устройства акустико-эмиссионной системы. Будучи похожими по форме на сигналы, возбуждаемые дефектообразованием, они приводят к ложным срабатываниям, что заставляет предъявлять повышенные требования к помехоустойчивости аппаратуры АЭ контроля.

Недостаточность разработанных методов и средств анализа акустических сигналов и помех приводит к низкой повторяемости результатов научных исследований и препятствует широкому использованию метода АЭ.

Теоретический анализ

Как было сказано выше, возникающие при разрушении материала акустические возмущения – сигналы акустической эмиссии – при распространении по образцу претерпевают значительные изменения. Сигнал АЭ в точке приема представляет собой сумму сигналов, пришедших различными путями. В результате искажается форма сигнала. Длительность импульсных сигналов при прохождении по образцу увеличивается в сотни и тысячи раз. Спектр суммы сигналов равен сумме спектров [5], следовательно, эффективная ширина спектра суммарного сигнала увеличиваться не должна, однако его неравномерность изменяется столь существенно, что остро встает вопрос анализа передаточной функции акустического тракта. Передаточные свойства акустического тракта описываются амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ). Классический путь исключения влияния АЧХ заключается в



расчете АЧХ и последующем пересчете спектральных характеристик принятых сигналов.

Объекты контроля из металлов, керамики и других материалов с высокими упругими свойствами можно с очень малой погрешностью считать линейными системами [6, 7]. В общем случае модуль спектральной характеристики сигнала, снимаемого с выхода приемного преобразователя, определяется выражением:

$$S_{np}(\omega) = S_u(\omega) \cdot K_{mp}(\omega) \cdot K_{np}(\omega), \quad (1)$$

где $S_{np}(\omega)$ и $S_u(\omega)$ – модули спектральных характеристик соответственно сигнала на выходе преобразователя и источника акустической эмиссии; $K_{mp}(\omega)$ и $K_{np}(\omega)$ – амплитудно-частотные характеристики соответственно акустического тракта (объекта контроля) и преобразователя.

Таким образом, для оценки спектральной характеристики необходимо знать АЧХ не только преобразователя, но и объекта контроля. В настоящее время вопросам измерения АЧХ преобразователей и синтеза преобразователей с заданной структурой АЧХ посвящено довольно значительное число работ [8]. Влияние АЧХ объекта на результат измерения энергетических характеристик, в том числе и спектральных, исследовано весьма слабо. В работе [3] предпринята попытка получить качественные и количественные оценки влияния структуры АЧХ объекта (тонкого длинного стержня) на результаты измерения спектральных характеристик. В работе [9] с использованием математического аппарата систем с распределенными параметрами [10, 11] получено выражение комплексного коэффициента передачи для одного типа волны:

$$K_{ст}(j\omega) = \frac{\text{ch}[\gamma(j\omega)(l-x)]}{\text{sh}[\gamma(j\omega)l]}, \quad (2)$$

где $\gamma(j\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega)$ – коэффициент затухания акустического сигнала, Нп/м; $\beta(\omega) = 2\pi/\lambda = \omega/v$ – коэффициент фазы; v – скорость распространения акустической волны; λ – длина волны; x – координата источника сигнала; l – длина стержня. При этом предполагается, что приемник и источник сигнала являются точечными. Если приемник расположить на торце стержня ($x=0$), то амплитудно-частотная характеристика такого стержня определится следующим образом:

$$K_{ст}(\omega) = |K_{ст}(j\omega)|, \quad (3)$$

Следовательно,

$$K_{CT}(\omega) = \sqrt{\frac{ch2\alpha(1-x) + \cos 2\frac{l-x}{v}\omega}{ch2\alpha l - \cos 2\frac{l}{v}\omega}}; \quad (4)$$

Из выражения (3) следует, что АЧХ стержня является функцией ряда параметров. Изменение $K_{CT}(\omega)$ в зависимости от частоты носит периодический характер с периодами $\Omega_1 = \pi \cdot V/l$ и $\Omega_2 = \pi \cdot V/(l-x)$.

На рис. 1 приведены АЧХ стержней, рассчитанные по формуле (3). Неравномерность АЧХ зависит от a , l , x и может изменяться от 1 до ∞ . Верхняя граница соответствует режиму стоячих волн при $a=0$.

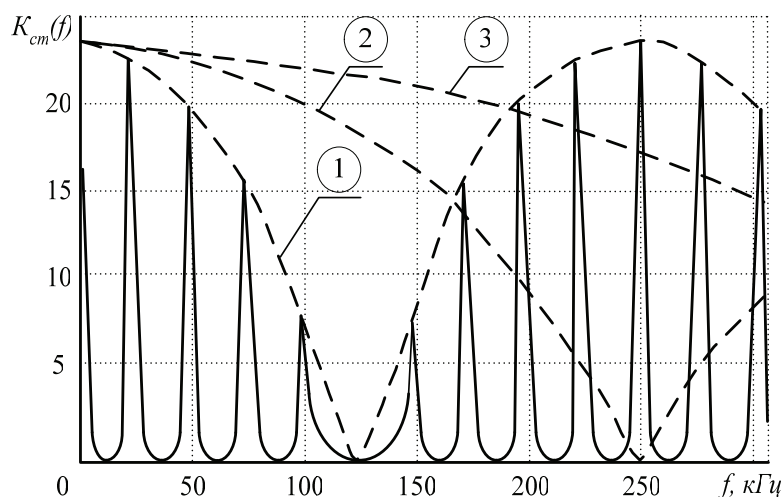


Рис. 1. Зависимость АЧХ стержня от координаты источника сигнала ($a = 0,4$ Нп/м, $v = 5 \cdot 10^2$ м/с, $l = 0,1$ м): кривая 1 – $x = 10$, кривая 2 – $x = 5$, кривая 3 – $x = 2,5$ мм

Анализ проведен для одного типа волны. В условиях, отличных от идеализированных, источник акустической эмиссии возбуждает в материале одновременно несколько типов волн. Кроме того, на структуру АЧХ системы «объект — преобразователь» существенно влияют следующие факторы: форма и размеры объектов контроля, изменения формы объекта в процессе испытаний, структуры материала, упругих свойств и многие другие. В общем случае их число может быть велико.

Чтобы показать сложность анализа спектральных характеристик (СХ) сигналов в таких условиях, рассмотрим простейший случай, когда источник в длинном тонком стержне возбуждает два типа волн со скоростями v_x и v_2 [4]. Сигнал на приемнике будет определяться су-



перпозицией двух волн и комплексный коэффициент передачи (ККП) акустического тракта может быть представлен в виде:

$$K_T(j\omega) = \frac{m_1 \operatorname{ch}[\gamma_1(j\omega)(1-x)]}{\operatorname{sh}[\gamma_1(j\omega)l]} + \frac{m_2 \operatorname{ch}_1[\gamma_2(j\omega)(1-x)]}{\operatorname{sh}[\gamma_2(j\omega)l]}, \quad (5)$$

где m_1 и m_2 – весовые коэффициенты, определяющие долю энергии акустического сигнала, переносимую волной соответствующего типа.

Коэффициенты m_1 и m_2 принимаются равновеликими, в противном случае $K_T(j\omega)$ вырождается в ККП для одного типа волны. Амплитудно-частотную характеристику стержня найдем как модуль выражения (5):

$$K_T(\omega) = \sqrt{\frac{M_1(\omega)}{M_2(\omega)}}, \quad (6)$$

где

$$M_1(\omega) = \frac{1}{4} \left\{ \begin{aligned} & \left(m_1^2 + m_2^2 \right) \operatorname{ch} 2a(1-x) - m_2^2 \cdot \operatorname{ch} 2a(1-x) \cos t_1 \omega - \\ & - m_1^2 \operatorname{ch} 2a(1-x) \cos t_3 \omega + m_2^2 \operatorname{ch} 2a \cos t_4 \omega - \frac{m_2^2}{2} \cos(t_1 + t_4) \omega - \\ & - \frac{m_2^2}{2} \cos(t_1 - t_4) \omega + m_1^2 \operatorname{ch} 2a \cos t_2 \omega - \frac{m_1^2}{2} \cos(t_2 + t_3) \omega - \\ & - \frac{m_1^2}{2} \cos(t_2 - t_3) \omega - \\ & - m_1 \cdot m_2 \cdot \left[\begin{aligned} & \cos(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \cdot \frac{\omega}{2} + \cos(t_1 - t_2 + t_3 - t_4) \frac{\omega}{2} - \\ & - \operatorname{ch} 2a(1-x) \cdot \cos(t_1 - t_2 - t_3 + t_4) \cdot \frac{\omega}{2} + \\ & + \operatorname{ch} 2a(1-x) \cos(t_1 - t_2 + t_3 - t_4) \cdot \frac{\omega}{2} - \\ & - \operatorname{ch} 2a \cos(t_1 + t_2 - t_3 - t_4) \frac{\omega}{2} + \operatorname{ch} 2a \cos(t_1 + t_2 - t_3 + t_4) \frac{\omega}{2} - \operatorname{ch} 2a \cos(t_1 - t_2 - t_3 - t_4) \frac{\omega}{2} + \operatorname{ch} 2a(1-x) \cos(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \frac{\omega}{2} \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

$$M_2(\omega) = \frac{1}{4} \left\{ \begin{aligned} &\text{ch}^2 2al - \text{ch} 2al \cdot \cos t_1 \omega - \text{ch} 2al \cdot \cos t_2 \omega - \text{ch} 2al \cdot \cos t_3 \omega + \\ &+ \frac{1}{2} \cos(t_1 - t_3) \omega + \frac{1}{2} \cos(t_1 + t_3) \omega \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$
$$t_1 = \frac{l}{\pi \cdot v_1}; \quad t_2 = \frac{l-x}{\pi \cdot v_1}; \quad t_3 = \frac{l}{\pi \cdot v_2}; \quad t_4 = \frac{l-x}{\pi \cdot v_{21}}.$$

При фиксированной координате точечного источника и приемника обобщенный ККП системы «объект – преобразователь» можно представить в виде суммы большого числа элементарных ККП. Из выражения (6) следует, что ККП является функцией как частоты, так и координаты источника. Соблюдение корректных условий спектрального анализа предполагает точное измерение координаты источника, определение (теоретически или экспериментально) АЧХ системы «объект – преобразователь» и восстановление спектра в окрестности источника. Выполнение этой процедуры при современном состоянии техники АЭ контроля представляется нереальным.

Постановка задачи

Свойства АЧХ определяются частотной зависимостью затухания акустических колебаний в материале, размерами и формой образца, координатами источника и приемника сигнала. Изменение затухания в низкочастотном диапазоне (до ед. МГц) носит, как правило, монотонный характер, имеет малую скорость и определяет наиболее общее медленное изменение АЧХ. Размеры и форма образца, а также координаты источника и приемника определяют как быстрые, так и медленные изменения АЧХ. Например, рассмотренная ранее АЧХ образцов из металла в виде стержней характеризуется периодическими изменениями с периодом $\Omega_1 = \pi \cdot V/l$ и $\Omega_2 = \pi \cdot V/(l-x)$ (где V – скорость распространения акустической волны, l – длина образца, x – координата источника). Ω_1 обычно называется резонансной, основной собственной частотой образца. Она определяет наиболее быстрые изменения АЧХ. Ω_2 зависит не только от V и l , но и от координаты x , и может меняться от Ω_1 до ∞ , т. е. может определять как быстрые, так и медленные изменения АЧХ.

При возбуждении в образце источником сигнала колебаний разных типов и трансформаций одних типов колебаний в другие число частот типа Ω_1 и Ω_2 возрастает. АЧХ образца $K(f)$ в общем случае является нелинейной функцией частоты, и определение ее становится очень сложной и трудной задачей. При неизвестных координатах источника



сигнала $K(f)$ – случайная функция. В этом случае образец можно характеризовать усредненной по ансамблю функцией $K(f)$ (усредненной АЧХ) и дисперсией $D(f)$, характеризующей погрешность измерения спектральной характеристики. При исследовании спектральных характеристик сигналов АЭ следует принять все меры к снижению погрешности измерений. Согласно [3] можно применить операцию «сглаживания», использовать образцы больших габаритов, устанавливать приемный преобразователь в центре образца или на его конце, добиваться локализации источника излучения в центре образца, применять акустические поглотители.

Сглаживанием или усреднением по частоте можно исключить быстрые изменения АЧХ, при этом полоса пропускания усредняющих фильтров должна быть существенно меньше эффективной ширины спектра исследуемого сигнала [3]. Образцы из керамики имеют малые размеры, поэтому эффективность усреднения невысока. Выбор интервала усреднения $\Delta f_{\text{уср}}$ нужно проводить с учетом особенностей спектральных характеристик сигналов и неравномерности АЧХ образцов.

Результаты экспериментальных исследований

Отличительная черта образцов из керамики – большая локальная неравномерность АЧХ, малые интервалы частот между ее соседними экстремумами и зависимость от координаты источника, которая чаще всего случайна. Все это определяют исключительно высокие требования к характеристикам измерительной аппаратуры: динамическому диапазону, разрешающей способности и точности.

Исследования АЧХ образцов из керамики проводились экспериментально с помощью 100-канальной установки «СПЕКТР» [10 – 13] с полосой пропускания канальных фильтров 10 кГц. В качестве источника «И» и приемника «П» акустического сигнала использовались широкополосные пьезопреобразователи [8, 14]. Задающий преобразователь (излучатель) возбуждался генератором шума с равномерной спектральной плотностью мощности в диапазоне от 0,02 до 2 МГц.

Сквозная АЧХ измерительного тракта системы из излучающего и приемного преобразователя приведена на рис. 2, кривая 5. Излучатель устанавливается непосредственно на приемный преобразователь. При исследованиях АЧХ образцов излучатель устанавливался как непосредственно на образцы «О» (рис. 3), так и через конус «К» (рис. 1, 2, 4, 5). Применение конуса позволяет обеспечить контакт излучателя с образцом, близкий к точечному, т. е. исключить направленные свойства излучателя. Следует отметить, что конус безусловно вносит частотные искажения и дополнительное затухание. Однако их можно считать по-

стоянными и, следовательно, не трудно учесть. Учитывая линейность системы «излучатель – конус – образец – приемник» (И-К-О-П), применение точечного излучателя (например, конуса) можно рекомендовать везде, где это позволяет мощность излучателя.

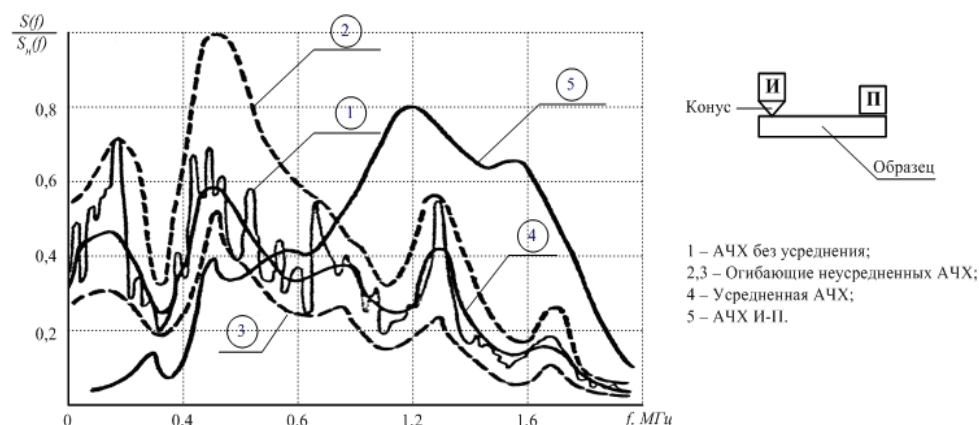


Рис. 2. АЧХ системы И-К-О-П

Кривая 1 характеризует спектр принятого сигнала на образце из электрофарфора. Видны и быстрые и более медленные изменения спектра. При перемещении излучателя в основном отличия новой спектрограммы заключаются в быстрых изменениях.

Следует учесть, что на пьезопреобразователь в режиме приема, как правило, воздействует последовательность отраженных импульсов, различных по амплитуде и сдвинутых по времени и фазе. Отраженные импульсы могут воздействовать на приемник одновременно, интерферируя на отрезке времени, равном разности длительности импульса и времени их сдвига, либо последовательно. И в том, и в другом случае следует ожидать существенных изменений АЧХ.

Кривые 2 и 3 характеризуют зону существования для блока из десяти спектрограмм, зарегистрированных при перемещении преобразователя в пределах 0,01 м. Свойства системы «излучатель - конус» и «образец – приемник» при этом не менялись. Значит, изменения сквозной частотной характеристики системы «излучатель – конус – образец-приемник» (И-К-О-П) обусловлено изменением АЧХ образца в зависимости от местоположения излучателя. Следовательно, как уже и отмечалось выше, быстрые изменения АЧХ информации о сигнале не несут и целесообразно их исключить.

Кривая 4 отображает дополнительно усредненную спектрограмму 1. Она не очень отличается от усредненной по ансамблю спектрограммы, что согласуется с выводом о малой величине дисперсии АЧХ при



небольшой зоне существования источников сигналов.

Кривая 5 представляет собой сквозную совмещенную АЧХ излучателя «И» и приемника «П», установленных один на другой. Он демонстрирует возможности аппаратуры, указывая области контроля с высокой достоверностью. Такой областью является частотный диапазон от 0,4 до 1,6 МГц. В области частот выше 1,6 и ниже 0,4 МГц существенно возрастает погрешность измерения и, соответственно, снижается достоверность полученных АЧХ.

Отталкиваясь от результатов проведенного анализа, в дальнейшем будем рассматривать только сглаженные по частоте АЧХ образцов и объектов контроля. Это позволит избежать дополнительной погрешности, вносимой при выполнении процедуры коррекции по АЧХ частотами типа Ω_1 . Анализ же спектра сигналов АЭ немыслим без анализа тонкой структуры спектральной функции, поэтому процедура сглаживания (усреднения) по частоте выполняется лишь для функций АЧХ и не распространяется на СХ сигналов АЭ. Использование процедуры сглаживания при нормализации СХ в дальнейшем может быть обусловлено лишь необходимостью снизить влияние АЧХ.

Сглаженные спектрограммы (рис. 3) характеризуют изменение АЧХ образца в зависимости от установки приемного преобразователя. Видно, что при размещении приемного преобразователя на торце (кривые 1, 2, 3) частотная характеристика более широкополосна, чем при установке приемника на боковой поверхности образца (кривые 4, 5) независимо от ориентировки излучателя. Не очень большая зависимость АЧХ от местоположения излучателя относится к точечному излучателю, обладающему малыми направленными свойствами.

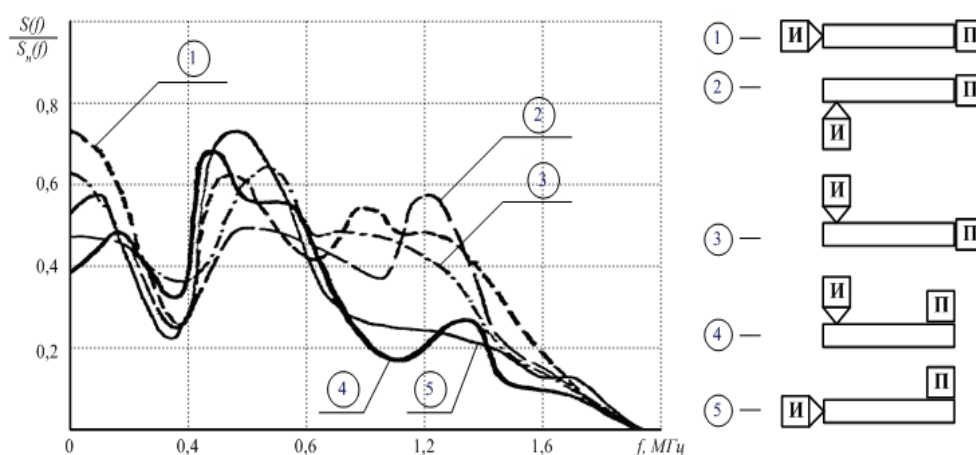


Рис. 3. АЧХ системы И-К-О-П

В случае же направленного излучателя сквозная АЧХ более существенно зависит от ориентировки излучателя относительно образца. В этом можно убедиться, сравнивая кривые рис.4, где показаны результаты анализа АЧХ при установке излучателя непосредственно на образце.

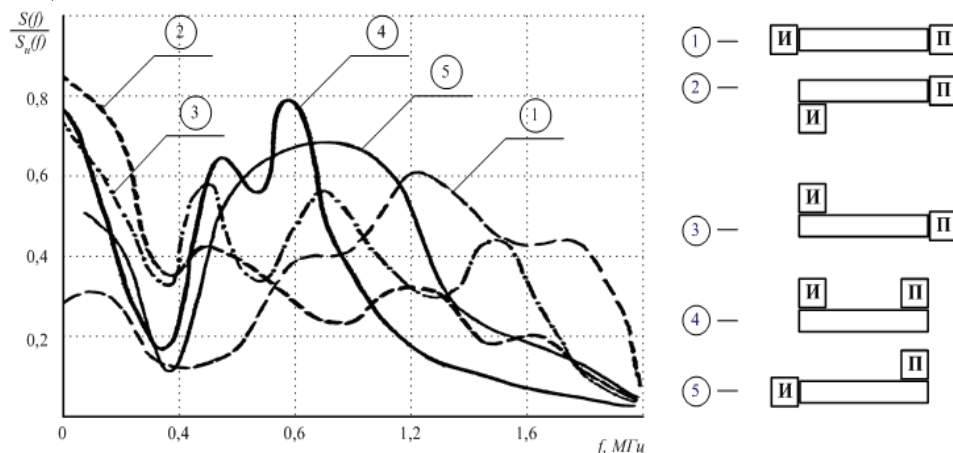


Рис. 4. АЧХ системы И-К-О-П

На рис.4 видно, что наиболее широкополосным является тракт передачи при установке приемника и излучателя на торцевых гранях образца (кривая 1). Установка излучателя и приемника на боковой поверхности образца (кривая 4) вносит наибольшее затухание в области высоких частот. Это объясняется большим влиянием диаграммы направленности. Даже использование сглаженных СХ не позволяет избежать большого разброса параметров зарегистрированных сигналов.

АЧХ системы «объект – преобразователь» зависит не только от места установки приемного преобразователя, но и от волновых свойств материала образца, а также координаты источника.

На рис. 5 показаны частотные характеристики сигналов, прошедших через образцы из различных материалов: кривая 1 – электрофарфор (ЭФ), 2 – алюмоборонитрид (АБН), 3 – корундовый огнеупор (СЗ), 4 – нитрид кремния (НКН). Установка излучателя и приемника производилась примерно одинаково. Видно, что по частотным свойствам в исследуемом диапазоне ЭФ и НКН близки друг другу, а СЗ - АБН. Материалы СЗ и АБН относятся к низкочастотным. Вследствие этого оценки АЧХ образца будут иметь большой разброс, т. к. АЧХ их сильно зависит от удаленности источника сигнала от приемника.

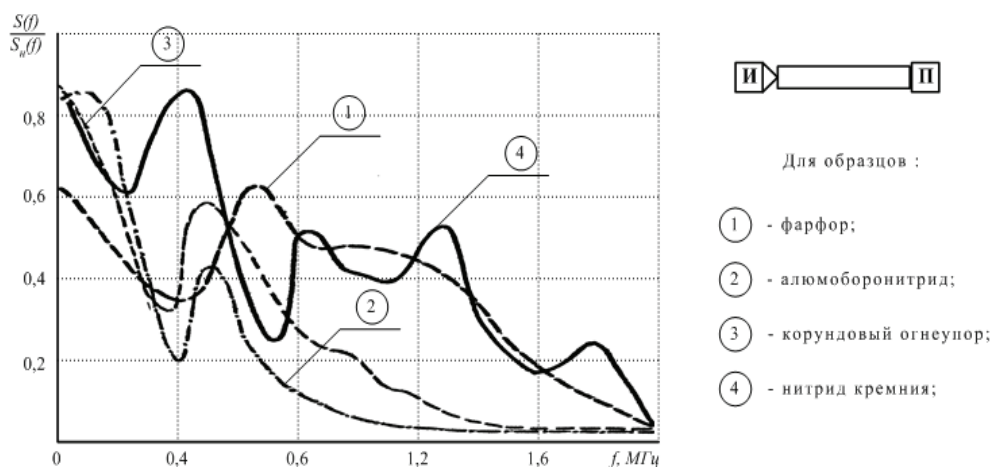


Рис. 5. АЧХ системы И-К-О-П

На рис. 6 показаны сглаженные спектры принятых сигналов, кривая 1 – при большом удалении приемника от излучателя, 2 – при малом. Для низкочастотных материалов необходимо более точно знать координату источника. Если сигнал широкополосный, то необходимо устанавливать приемник как можно ближе к источнику сигнала.

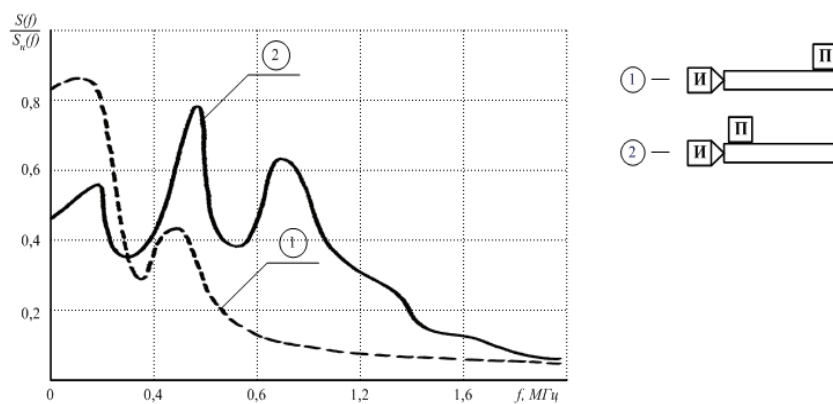


Рис. 6. АЧХ системы И-К-О-П

Методика измерения спектральных характеристик

На основании проведенного анализа можно предположить следующий путь измерения спектральных характеристик сигналов АЭ:

1. Оценить АЧХ точечного излучателя:

а) установить образец торцевой гранью на образцовый излучатель типа ИУС, на другую торцевую грань установить широкополосный приемный преобразователь, зарегистрировать спектр сигнала с его выхода $S_{np1}(f)$. Уровень шума с генератора должен обеспечивать макси-

мальные значения $S_{np}(f_i)$ равным 0,8–1,0 от верхнего значения предела измерения;

б) установить точечный (широкополосный преобразователь с конусом) вместо образцового излучателя, зарегистрировать спектр $S_{np2}(f_i)$;

в) вычислить $K_u(f_k)$:

$$K_u(f_k) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{S_{np2}(f_{mk+j}) S_{ш1} K_o(f_{mk+j})}{S_{np1}(f_{mk+j}) S_{ш2}}, \quad (9)$$

где $K_o(f_{mk+j})$ – частотная характеристика образцового излучателя; $S_{ш1}$ и $S_{ш2}$ – потенциальный спектр шума с выхода генератора шума при регистрации соответственно $S_{np1}(f_{mk+j})$ и $S_{np2}(f_{mk+j})$; $f_{mk+j} = f_i$ – частота очередного канала; i – номер канала анализатора спектра от 1 до 100; $m = \frac{\Delta f_{yep}, \text{кГц}}{20}$ – число усредняемых каналов (при $\Delta f_{yep} = 100$ кГц, $m = 5$); k – коэффициент, определяющий номер очередного интервала усреднения, меняется от 0 до $K_{\max}$; $m(K_{\max} - 1) = 100$; j – коэффициент, меняется от 1 до m ; f_k – средняя частота k -го интервала усреднения, при $f_{yep} = 100$ кГц $f_k = 60, 160, 260 \dots$ кГц.

2. Оценить частотную характеристику образца.

а) определить зону возможного существования источников;

б) перемещая точечный излучатель по выявленной зоне, регистрировать спектральные характеристики сигналов на выходе приемного преобразователя. Произвести n (10 – 20) измерений $S_l(f)$. Шаг перемещения по зоне равномерный или случайный;

в) выполнить операцию усреднения по частоте каждой спектрограммы:

$$\tilde{S}_l(f_k) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m S_l(f_{mk+j}); \quad (10)$$

г) выполнить операцию усреднения АЧХ системы И-К-О-П по ансамблю:

$$\tilde{S}_{cp}(f_k) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{l=1}^n \tilde{S}_l(f_k); \quad (11)$$

д) оценить дисперсию усредненных АЧХ:

$$D(f_k) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{l=1}^n [\tilde{S}_l(f_k) - \tilde{S}_{cp}(f_k)]^2; \quad (12)$$

е) рассчитать усредненную АЧХ образца и приемного преобразо-



вателя:

$$\tilde{K}(f_k) = \tilde{S}_{cp}(f_k) / K_u(f_k); \quad (13)$$

3. Оценить спектр АЭ.

а) зарегистрировать спектр сигнала АЭ с выхода приемного преобразователя;

б) провести усреднение $S_{AЭ}(f)$ по частоте:

$$\tilde{S}_{AЭ}(f_k) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m S_{AЭ}(f_{mk+j}); \quad (14)$$

в) рассчитать спектр АЭ в месте излучения:

$$S_{AЭИ}(f_k) = \tilde{S}_{AЭ}(f_k) / \tilde{K}(f_k). \quad (15)$$

4. Оценить погрешность измерения $S_{AЭИ}(f_k)$:

$$\delta_H(f_k) = \sqrt{\delta_{S_{ИП1}}^2(f_k) + \delta_{S_{ИП2}}^2(f_k) + \delta_{ko}^2 + D(f_k) / S_{cp}^2(f_k) + \delta_{S_{AЭ}}^2(f_k)}; \quad (16)$$

При этом следует учитывать, что $\delta_{S_{ИП1}}(f_k)$, $\delta_{S_{ИП2}}(f_k)$ и $\delta_{S_{AЭ}}(f_k)$ зависят от того, в какой части шкалы регистрировался результат измерения.

Погрешность анализатора можно оценить как $\delta_a = 0,1 \div 0,02 \cdot S_H / S_H(f)$, где S_H – номинальное значение предела шкалы используемого поддиапазона; $S_H(f)$ – измеренное значение спектральной плотности сигнала поданного на вход анализатора на данной частоте.

Форма оценки δ_a отражает возрастание погрешности при замере на нижней части шкалы, т. е. малых значений спектральной плотности на данном пределе.

Выводы

1. Перед измерением спектральных характеристик сигналов АЭ на образцах керамики необходимо оценить АЧХ системы «образец - приемный преобразователь».

2. Для измерения спектральных характеристик сигналов АЭ следует использовать широкополосные преобразователи с подъемом АЧХ в сторону верхних частот для компенсации неравномерности АЧХ образца и частично самого спектра сигнала, что позволит снизить погрешность измерения.

3. Следует оценить погрешность измерения, ее распределение по диапазону, чтобы знать границы применимости полученных оценок спектральных характеристик сигналов АЭ.

4. Если допускают условия задачи, то предпочтительно ограничиться относительными измерениями спектральных характеристик



сигналов АЭ, что позволит снизить погрешность измерения.

Библиографические ссылки

1. Патон Б. Е. О диагностике несущей способности сварных конструкций / Автоматическая сварка. 1981. № 9.
2. Вайнберг В. Е., Кац М. С., Пурич Е. Н. Влияние размеров образцов на частотный спектр акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1984. № 4.
3. Горбунов А. И., Лыков Ю. И. Влияние амплитудно-частотной характеристики объекта на спектральные характеристики сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1986. № 9.
4. Горбунов А. И., Лыков Ю. И. Влияние амплитудно-частотной характеристики объекта контроля на измерение спектров акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1988. № 12.
5. Гоноровский Н. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., 1977.
6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Под ред. И. П. Голямина. М., 1979.
7. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Нелинейные явления при распространении упругих волн в твердых телах // УФН. 1970. 102.
8. Колмогоров В. Н., Соседов В. Н., Глухов Н. А. Приемники сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1980. № 7.
9. Лыков Ю. И., Батуев В. Г., Панин В. И., Бакшеев В. Г. Частотная характеристика стержней при измерении спектральной плотности сигналов акустической эмиссии // Тез. докл. 4-й отрасл. науч.-техн. конф. «Повышение надежности авиационной техники средствами неразрушающего контроля». М., 1983.
10. Бутковский А. Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. М., 1979.
11. Исакович М. А. Общая акустика. М., 1973.
12. Горбунов А. И., Лыков Ю. И., Овчарук В. Н., Острицкий А. С. Установка «Спектр» для анализа спектральных характеристик акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1988. № 1.
13. А. с. 1075145. Устройство для измерения спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии / Ю. И. Лыков, А. И. Горбунов, В. Н. Овчарук Бюл. ИОПОТЗ, № 7. 1984.
14. А. с. 1527577. Способ обнаружения развивающихся трещин / Ю. И. Лыков, В. Н. Овчарук Бюл. ИОПОТЗ, № 45. 1989.
15. А. с. 534624. Способ изготовления пьезоэлектрических преобразователей. / В. Н. Колмогоров, Г. Ф. Пашенко Бюл. ИОПОТЗ, № 43. 1976.
16. Гогоци Г. А., Галенко В. Н., Завада В. П. К методике испытаний при четырехточечном нагружении // Проблемы прочности. 1981. № 2.