



УДК 620.179.16

© 2005 г. **В.Н. Овчарук**, канд. техн. наук,  
**Чье Ен Ун**, д-р техн. наук  
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

## **АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО–ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

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.

### **Введение**

Распространяющийся в объекте акустический сигнал претерпевает существенные искажения в результате воздействия системы «объект-преобразователь». Такие искажения настолько значительны [1 – 3], что практически не представляется возможным восстановить истинную форму исходного сигнала. По этой причине параметры акустической эмиссии (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.

### **Теоретические исследования**

Как было сказано выше, возникающие при разрушении материала акустические возмущения – сигналы акустической эмиссии (АЭ) при рас-

пространении 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 [4], 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 их расчете 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 [5]. В общем случае модуль спектральной характеристики сигнала, снимаемого с выхода приемного преобразователя, определяется выражением:

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

где  $S_{np}(w)$  и  $S_u(w)$  – модули спектральных характеристик соответственно сигнала на выходе преобразователя и источника акустической эмиссии (АЭ);  $K_{mp}(w)$  и  $K_{np}(w)$  – амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) 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 [6]. Влияние АЧХ объекта на результат измерения энергетических характеристик, в том числе и спектральных, исследовано весьма слабо. В работе [2] предпринимается попытка получить качественные и количественные оценки влияния структуры АЧХ объекта (тонкого длинного стержня) на результаты измерения спектральных характеристик. Там же с использованием математического аппарата систем с распределенными параметрами [7, 8] получено выражение комплексного коэффициента передачи для одного типа волны:

$$K_{CT}(jw) = \frac{ch[g \cdot (jw) \cdot (l - x)]}{sh[g \cdot (jw) \cdot l]}, \quad (2)$$

где  $g \cdot (jw) = a(w) + jb(w)$  – коэффициент затухания акустического сигнала, Нп/м;  $b(w) = 2p/l = w/v$  – коэффициент фазы;  $v$  – скорость распространения акустической волны;  $l$  – длина волны;  $x$  – координата источника сигнала;  $l$  – длина стержня. При этом предполагается, что прием-

ник и источник сигнала являются точечными. Если приемник расположить на торце стержня ( $x = 0$ ), то амплитудно-частотная характеристика такого стержня определится следующим образом:

$$K_{CT}(w) = | K_{CT}(jw) |, \quad (3)$$

т.е.

$$K_{CT}(w) = \sqrt{\frac{ch2a(1-x) + \cos 2 \frac{l-x}{v} w}{ch2al - \cos 2 \frac{l}{v} w}}. \quad (4)$$

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

На рис. 1 приведены АЧХ стержней, рассчитанные по формуле (3), при следующих значениях параметров:  $a = 0,4 \text{ Hn/m}$ ;  $v = 5 \cdot 10^2 \text{ м/с}$ ;  $l = 0,1 \text{ м}$ ;  $1 - x = 10$ ;  $2 - x = 5$ ;  $3 - x = 2,5 \text{ мм}$ . Неравномерность АЧХ зависит от  $l$ ,  $x$  и может изменяться в широких пределах. Верхняя граница соответствует режиму стоячих волн при  $a = 0$ .

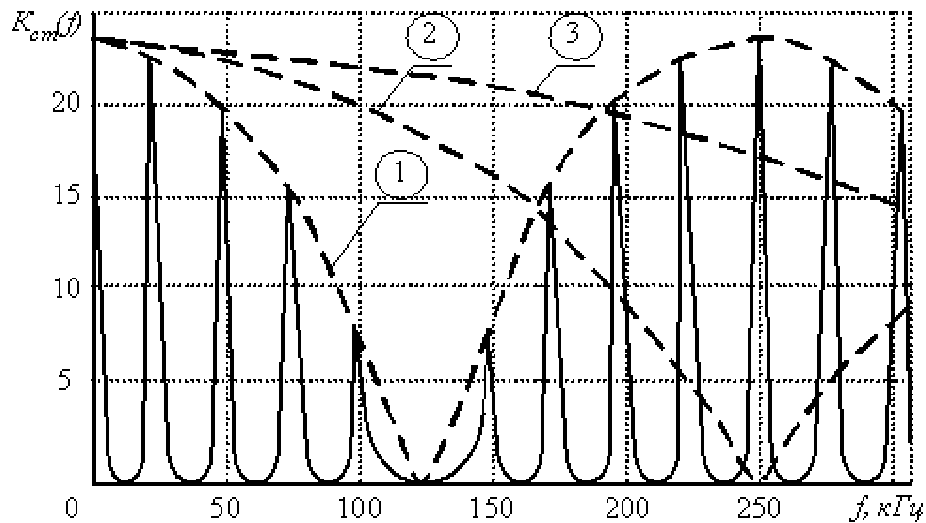


Рис. 1. Зависимость АЧХ стержня от координаты источника сигнала.

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 др. В общем случае их число может быть велико.

Чтобы показать сложность анализа СХ сигналов в таких условиях, рассмотрим простейший случай, когда источник в длинном тонком стерж-

не возбуждает два типа волн со скоростями  $V_1$  и  $V_2$  [3]. Сигнал на приемнике будет определяться суперпозицией двух волн, и комплексный коэффициент передачи (ККП) акустического тракта может быть представлен в виде:

$$K_T(j\omega) = \frac{m_1 \cdot ch[g_1(j\omega) \cdot (l-x)]}{sh[g_1(j\omega) \cdot l]} + \frac{m_2 \cdot ch[g_2(j\omega) \cdot (l-x)]}{sh[g_2(j\omega) \cdot l]}, \quad (5)$$

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-частотная характеристика стержня определяется из выражения (5) в виде

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

$$M_1(\omega) = \frac{1}{4}(M_{11}(\omega) - M_{12}(\omega)), \quad (7)$$

$$M_2(\omega) = \frac{1}{4} \cdot \left\{ ch^2 2a\omega - ch2a\omega \cdot \cos t_1 \omega - ch2a\omega \cdot \cos t_2 \omega - ch2a\omega \cdot \cos t_3 \omega + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cos(t_1 - t_3)\omega + \frac{1}{2} \cos(t_1 + t_3)\omega \right\}, \quad (8)$$

где использованы следующие обозначения:

$$M_{11}(\omega) = (m_1^2 + m_2^2) \cdot ch2a(l-x) - m_2^2 \cdot ch2a(l-x) \cdot \cos t_1 \omega - \\ - m_1^2 ch2a(l-x) \cdot \cos t_3 \omega + m_2^2 ch2a\omega \cos t_4 \omega - \frac{m_2^2}{2} \cos(t_1 + t_4)\omega - \\ - \frac{m_2^2}{2} \cos(t_1 - t_4)\omega + m_1^2 \cdot ch2a\omega \cdot \cos t_2 \omega - \frac{m_1^2}{2} \cos(t_2 + t_3)\omega - \\ - \frac{m_1^2}{2} \cos(t_2 - t_3)\omega;$$

$$M_{12}(\omega) = m_1 \cdot m_2 \cdot \left\{ \cos \frac{\omega}{2} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) + \cos \frac{\omega}{2} \cdot (t_1 - t_2 + t_3 - t_4) - \right. \\ - ch2a(l-x) \cos \frac{\omega}{2} \cdot (t_1 - t_2 - t_3 + t_4) + ch2a(l-x) \cdot \cos \frac{\omega}{2} \cdot (t_1 - t_2 + t_3 - t_4) - \\ - ch2a\omega \cdot \cos \frac{\omega}{2} \cdot (t_1 + t_2 - t_3 - t_4) + ch2a\omega \cdot \cos \frac{\omega}{2} \cdot (t_1 + t_2 - t_3 + t_4) - \\ \left. - ch2a\omega \cdot \cos \frac{\omega}{2} \cdot (t_1 - t_2 - t_3 - t_4) + ch2a(l-x) \cdot \cos \frac{\omega}{2} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \right\};$$

$$t_1 = \frac{l}{p \cdot v_1}; \quad t_2 = \frac{l-x}{p \cdot v_1}; \quad t_3 = \frac{l}{p \cdot v_2}; \quad t_4 = \frac{l-x}{p \cdot v_2}.$$

Для упрощения в выражении (6) затухание  $a$  разных типов волн принято одинаковым и частотно-независимым. Но даже при таких допущениях выражение для АЧХ получилось довольно громоздким. С увеличением числа типов волн и мерности объекта оно становится настолько сложным, что не поддается детальному анализу. 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.

### Результаты экспериментальных исследований

Исследования АЧХ образцов из керамики проводились экспериментально с помощью 100-канальной установки «Спектр» [9 – 11] с полосой пропускания канальных фильтров 10 кГц. В качестве источника «И» и приемника «П» акустического сигнала использовались широкополосные пьезопреобразователи [6]. Задающий преобразователь (излучатель) возбуждался генератором шума с равномерной спектральной плотностью мощности в диапазоне от 0,02 до 2 МГц.

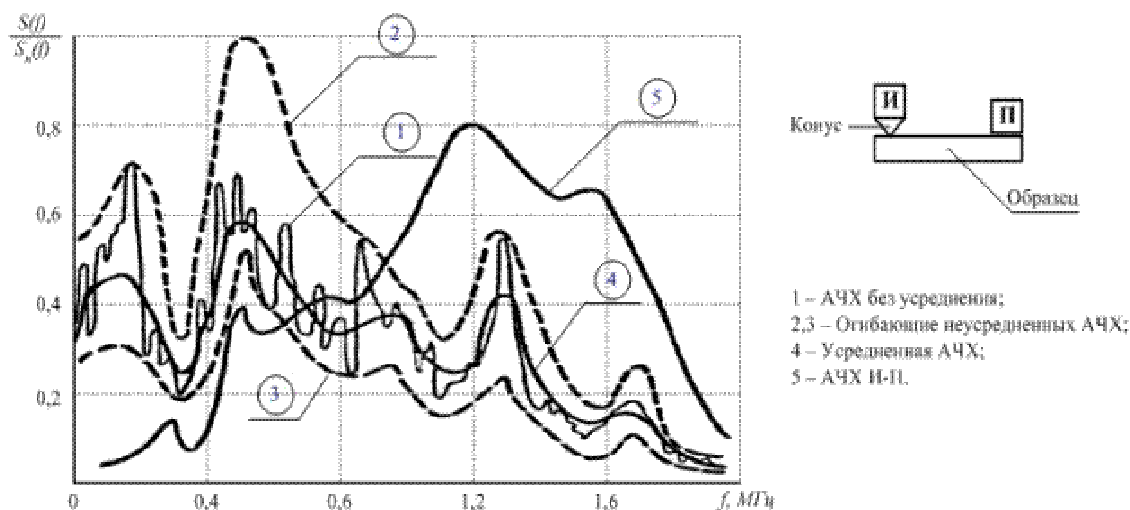


Рис. 2. АЧХ системы излучатель-конус-образец-приемник (И-К-О-П).

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. Конечно, конус вносит частотные искажения, однако их можно считать постоянными и, следовательно, нетрудно учесть.

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

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

Сглаженные спектрограммы, показанные на 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.

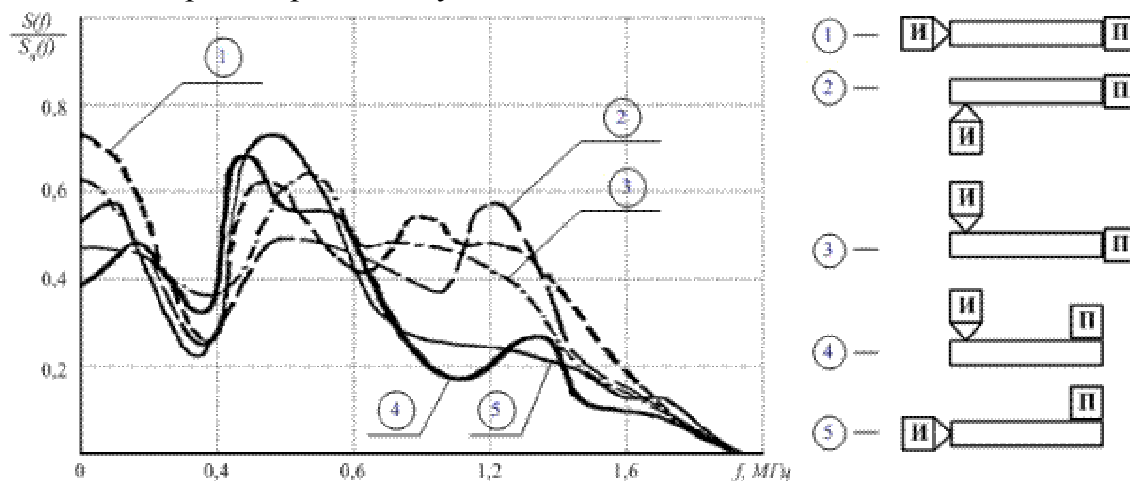


Рис. 3. Сглаженные АЧХ системы И-К-О-П.

Не очень большая зависимость АЧХ от местоположения излучателя относится к точечному излучателю, обладающему малыми направленными свойствами. В случае же направленного излучателя сквозная АЧХ более

существенно зависит от ориентировки излучателя относительно образца. В этом можно убедиться, сравнивая кривые, показанные на рис. 4.

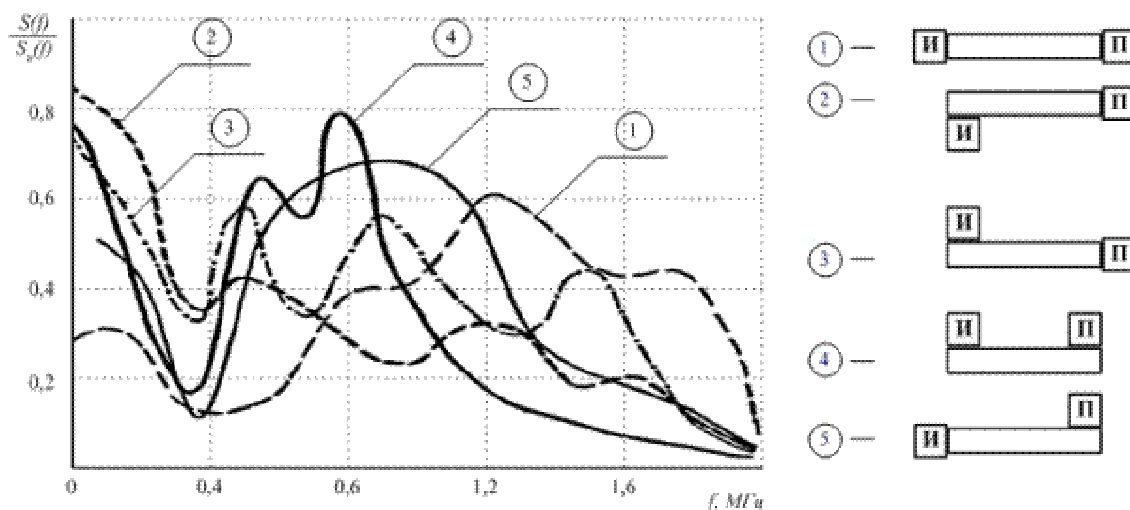


Рис. 4. Сглаженные АЧХ системы И-О-П.

Излучатель устанавливался непосредственно на образец. Наиболее широкополосным является тракт передачи при установке приемника и излучателя на торцовых гранях образца (кривая 1). Установка излучателя и приемника на боковой поверхности образца (кривая 4) вносит наибольшее затухание в области высоких частот.

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.

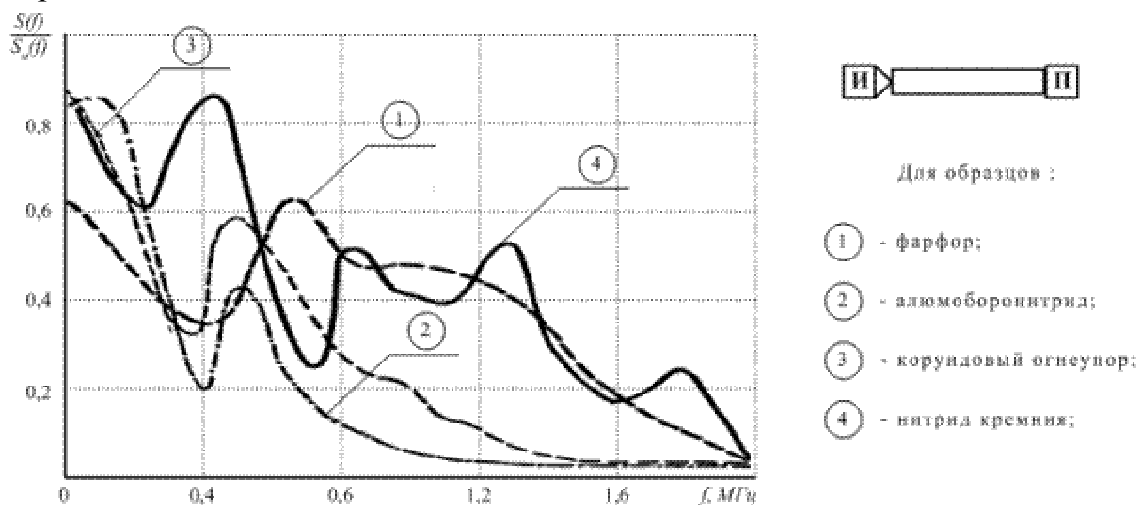


Рис. 5. Зависимость АЧХ системы И-К-О-П от материала образца.

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, так как АЧХ их сильно зависит от удаленности источника сигнала от приемника.

На рис. 6 показаны сглаженные спектры принятых сигналов: кривая 1 – при большом удалении приемника от излучателя и 2 – при малом.

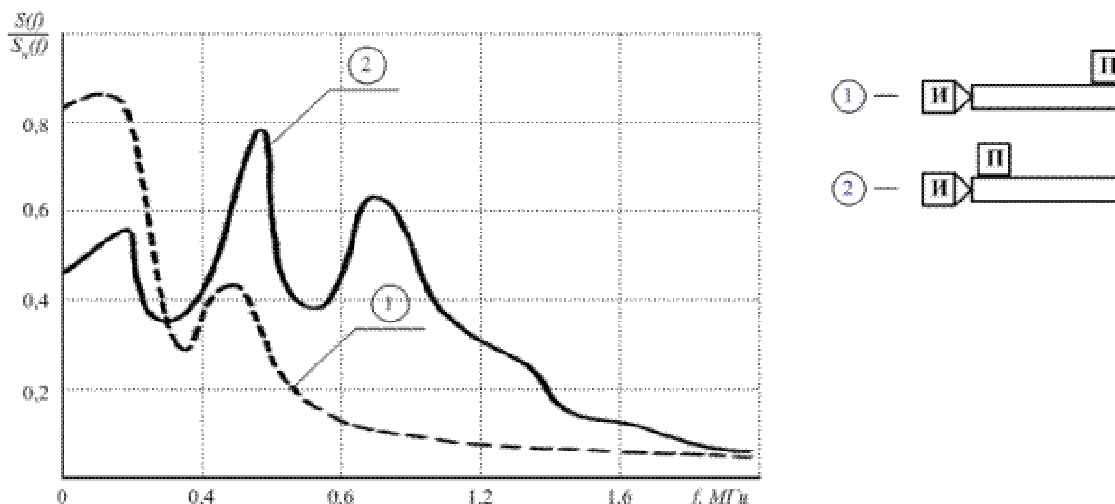


Рис.6. Зависимость АЧХ системы И-К-О-П от координаты источника.

Для низкочастотных материалов необходимо более точно знать координату источника. Если исходный сигнал имеет широкий спектр, то необходимо устанавливать приемник как можно ближе к источнику сигнала.

### Методика измерения спектральных характеристик

Можно предположить следующий путь измерения спектральных характеристик сигналов АЭ.

1. Оценить АЧХ точечного излучателя:

а) установить образец торцовой гранью на образцовый излучатель типа ИУС, на другую торцовую грань установить широкополосный приемный преобразователь, зарегистрировать спектр сигнала с его выхода  $S_{np1}(f)$ . Уровень шума с генератора должен обеспечивать максимальные значения  $S_{np}(f_i)$  равными  $0,8 \div 1,0$  от верхнего значения предела измерения;

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

в) вычислить значение

$$K_u(f_k) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{S_{np2}(f_{mk+j}) \cdot S_{u1} \cdot K_o(f_{mk+j})}{S_{np1}(f_{mk+j}) \cdot S_{u2}}, \quad (9)$$

где  $K_o(f_{mk+j})$  – частотная характеристика образцового излучателя;  $S_{u1}$  и  $S_{u2}$  – 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 оче-



редного канала;  $i$  – номер канала анализатора спектра от 1 до 100;  
 $m = \frac{\Delta f_{ycp}, \text{кГц}}{20}$  – число усредняемых каналов (при  $\Delta f_{ycp} = 100$  кГц,  $m = 5$ );

$k$  – коэффициент, определяющий номер очередного интервала усреднения, со значениями от 0 до  $K_{\max}$ ;  $m(K_{\max} - 1) = 100$ ;  $j$  – коэффициент, изменяющийся от 1 до  $m$ ;  $f_k$  – средняя частота  $k$ -го интервала усреднения, при  $f_{ycp} = 100$  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  $n$  ( $10 \div 20$ ) 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 преобразователя

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

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  $S_{AЭИ}(f_k)$  в виде

$$d_{И}(f_k) = \sqrt{d_{S_{ИП1}}^2(f_k) + d_{S_{ИП2}}^2(f_k) + d_{k0} + D(f_k) / S_{cp}^2(f_k) + d_{S_{AЭ}}^2(f_k)}. \quad (16)$$

При этом следует учитывать, что  $d_{S_{ПП1}}(f_k)$ ,  $d_{S_{ПП2}}(f_k)$  и  $d_{S_{АЭ}}(f_k)$  зависят от того, в какой части шкалы регистрировался результат измерения.

Погрешность анализатора можно оценить как

$$d_a = 0,1 \div 0,02 \cdot S_H / S_H(f),$$

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  $d_a$  отражает возрастание погрешности при замере на нижней части шкалы, т.е. малых значений спектральной плотности на данном пределе.

*Пример 1.* Пусть результат измерения характеристик  $S_{np1}(f_k)$ ,  $S_{np2}(f_k)$  и  $S_{АЭ}(f_k)$  на  $f_k$  отсчитывался в верхней части шкалы, т.е.  $d_{S_{ПП1}}(f_k) \approx d_{S_{ПП2}}(f_k) \approx d_{S_{АЭ}}(f_k) \approx 0,1$ , что для излучателя типа ИУС составляет примерно 25% ( $d_{Ko} \approx 0,25$ ). Пусть дисперсия на  $f_k$  равна 0,1 (и пусть  $S_{cp}(f_k)$  регистрировалась в верхней части шкалы), т.е.  $D(f_k) / S_{cp}^2(f_k) = 0,1$ . Тогда  $d_H(f_k) = 0,45$ , т.е. погрешность оценки спектра АЭ составит 45%. Если принять  $D(f_k) = 0$ , тогда  $d_H(f_k) \approx 0,30$  (30%) – это максимально достижимая погрешность оценки с применением установки «Спектр».

*Пример 2.* Пусть результаты измерения  $S_{np1}(f_k)$ ,  $S_{np2}(f_k)$  и  $S_{АЭ}(f_k)$  отсчитывались на уровне 0,1 от предела измерения, т.е.  $d_{S_{ПП1}}(f_k) \approx d_{S_{ПП2}}(f_k) \approx d_{S_{АЭ}}(f_k) \approx 0,3$ . При  $d_{Ko} \approx 0,25$ , и  $D(f_k) = 0$  погрешность измерения  $d_{S_{АЭ}}(f_k) = 0,6$  (60%).

### Заключение

Перед измерением спектральных характеристик сигналов АЭ на образцах керамики необходимо оценить АЧХ системы «образец-приемный преобразователь»; для измерения спектральных характеристик сигналов АЭ нужно 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; следует оценить погрешность измерения, ее распределение по диапазону, чтобы знать границы применимости полученных оценок спектральных характеристик сигналов АЭ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнберг В.Е., Кац М.С., Пурич Е.Н. Влияние размеров образцов на частотный спектр акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1984. №4. С.110-111.
2. Горбунов А.И., Лыков Ю.И. Влияние амплитудно-частотной характеристики объек-

- та на спектральные характеристики сигналов акустической эмиссии //Дефектоскопия. 1986. №9. С.39-45.
3. Горбунов А.И., Лыков Ю.И. Влияние амплитудно-частотной характеристики объекта контроля на измерение спектров акустической эмиссии //Дефектоскопия. 1988. №12. С.32-41.
  4. Гоноровский Н.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1977.
  5. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Нелинейные явления при распространении упругих волн в твердых телах. //УФН. 1970. 102. С.549-584.
  6. Колмогоров В.Н., Соседов В.Н., Глухов Н.А. Приемники сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1980. №7. С. 94-96.
  7. Бутковский А. Г. Характеристики систем с распределенными параметрами (справочное пособие). М.: Наука. 1979.
  8. Исакович М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973.
  9. Горбунов А. И., Лыков Ю. И., Овчарук В.Н., Острицкий А. С. Установка «Спектр» для анализа спектральных характеристик акустической эмиссии //Дефектоскопия. 1988. № 1. С.31-36.
  10. Лыков Ю.И., Горбунов А.И., Овчарук В.Н. Устройство для измерения спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии. Авт. свид. №1075145 //Бюллетень ОИПОТЗ. №7. 1984.
  11. Лыков Ю.И., Овчарук В.Н. Способ обнаружения развивающихся трещин. Авт. свид. №1527577 //Бюллетень ОИПОТЗ. №45. 1989.