

УДК 534.286-8:534.232.082.73

Н.В. Богданова, канд. техн. наук, **О.Н. Петрищев**, д-р. тех. наук

Национальный Технический Университет Украины «Киевский Политехнический Институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Оценка затухания, вносимого пьезоэлектрическим преобразователем при измерениях коэффициентов поглощения энергии ультразвуковых колебаний в упругих средах

На примере стандартного метода измерения коэффициентов затухания ультразвуковых волн рассматривается актуальный для современной акустотехники вопрос о влиянии измерительного прибора на результаты измерения. Показано, что при обработке результатов измерения в обязательном порядке необходимо учитывать передаточные характеристики используемого ультразвукового преобразователя. Игнорирование этого требования может привести к грубым ошибкам, которые могут составить основу для ложных заключений относительно качественных характеристик исследуемого материала. Последнее убедительно показано на модельном примере. Библ. 6, рис. 11.

Ключевые слова: коэффициент затухания, акустические измерения, передаточная характеристика, электроакустический преобразователь, ультразвук.

Введение

Общеизвестно, что по результатам измерений на различных частотах коэффициентов затухания продольных и поперечных ультразвуковых волн можно судить о микроструктуре (зернистости) материалов [4]. Различные методики измерения коэффициентов затухания ультразвуковых волн (см., например, [5]) в конечном счете сводятся к измерениям амплитуд ультразвуковых импульсов, которые прошли различные расстояния в объеме исследуемого материала. Классическая схема измерения коэффициентов затухания приведена на рис.1а. На рис.1б показаны временные диаграммы разности электрических потенциалов на электрическом выходе электроакустического преобразователя (аббревиатура ЭАП на рис.1а). В самом начале процедуры измерения коэффициента затухания происходит запуск ультразвукового импульса в объем исследуемого материала. Это происходит в результате подачи на электродированные поверхности $x_2 = 0$ и $x_2 = -\alpha$ раз

ности электрических потенциалов от внешнего генератора (он на рис.1а не показан). Вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта в пластинке возникают упругие колебания, которые через поверхность механического контакта $x_2 = 0$ поступают в исследуемый образец. Достигнув донной поверхности $x_2 = L$ образца ультразвуковой импульс отражается и при этом формируется волна, падающая на электроакустический преобразователь (символ $u^{\text{пад}}$ на рис.1а). Следует заметить, что в момент окончания процесса излучения ультразвукового импульса электроакустический преобразователь соответствующими коммутациями электронных схем переводится в режим приема упругих колебаний. Через интервал времени $\Delta t = 2L/v$ (v – скорость распространения упругих волн в исследуемом материале) с момента начала излучения первый отраженный от донной поверхности импульс $u^{\text{пад}}$ достигает электроакустического преобразователя, деформирует пьезоэлектрическую пластинку и отражается от поверхности $x_2 = 0$ в объем образца. (символ $u^{\text{отр}}$ на рис.1а). Деформации пьезоэлектрической пластинки сопровождаются появлением поляризованных зарядов, которые уравниваются током свободных зарядов (электронов) в замкнутой электрической цепи, в результате чего на электрической нагрузке (символ Z_n на рис.1а) возникает падение электрического напряжения $U_{\text{вых}}(t)$. Форма электрического импульса показана первой фигурой на рис.1б. Упругая волна $u^{\text{отр}}$ достигает донной поверхности образца и, отражаясь, формирует новый ультразвуковой импульс $u^{\text{пад}}$, который регистрируется электроакустическим преобразователем и на электрической нагрузке Z_n формируется второй электрический импульс $U_{\text{вых}}(t)$. При этом вновь возникает отраженный ультразвуковой импульс $u^{\text{отр}}$ и ситуация повторяется вновь и вновь. В процессе обработки результатов измерений происходит сравнение амплитудных значений импульсов электрического напряжения и вычисляется коэффициент затухания ультразвуковых волн.

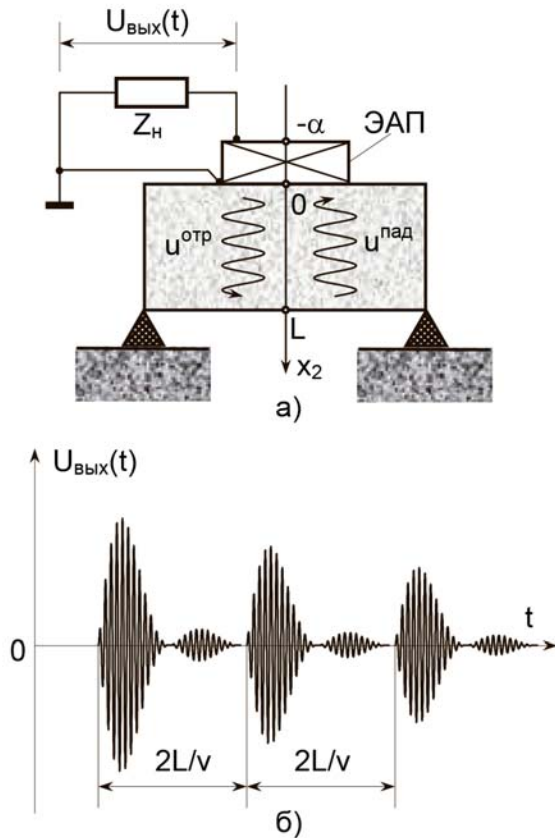


Рис. 1. Схема измерения затухания ультразвуковых волн в твердых телах (а) и временные диаграммы (б) сигналов на электрическом выходе электроакустического преобразователя

При обработке результатов эксперимента, о котором шла выше речь, предполагается [5], что коэффициент отражения ультразвуковой волны от границы раздела пьезоэлектрическая пластинка – исследуемый образец практически равен единице. Вместе с тем параметры напряженно – деформированного состояния пьезоэлектрической пластинки существенным образом зависят от частоты и, следует ожидать, что это оказывает определенное влияние на величину коэффициента отражения ультразвуковой волны – его величина, заведомо меньшая единицы, становится зависимой от частоты. Это обстоятельство можно интерпретировать как дополнительное затухание, которое вносится в образец измерительной системой, т.е. электроакустическим преобразователем. Насколько известно авторам, в настоящее время отсутствуют публикации, в которых бы обсуждались результаты исследования вносимого преобразователем затухания. Настоящая статья восполняет отмеченный недостаток.

1. Расчет коэффициента отражения от поверхности пьезоэлектрического преобразователя

Для того, чтобы получить количественную оценку величины затухания, вносимого пьезоэлектрическим преобразователем, рассмотрим представленную на рис.2 расчетную схему, которая соответствует случаю толщинных колебаний пьезоэлектрической пластинки (символ ПЭ на рис.2). В режиме толщинных колебаний масштаб неоднородности напряженно-деформированного состояния пластинки (длина волны) соизмерим с толщиной пластинки α и поэтому смещения материальных частиц пьезоэлектрика $\bar{u}^{(0)}(x_2, \omega)$ в центральной области не зависят от значений координат x_1 и x_3 . Говоря иными словами, боковые поверхности пьезоэлектрической пластинки не оказывают заметного влияния на характеристики напряженно-деформированного состояния центральной части пластинки. Это дает основания для представления пластинки на расчетной схеме слоем толщиной α . Помимо этого на этих же основаниях будем полагать, что смещения материальных частиц в пьезоэлектрической пластинке, в исследуемом образце (среда 1 на рис.2) и в тыловой акустической нагрузке преобразователя (среда 2 на рис.2) ориентированы преимущественно вдоль оси Ox_2 , т. е. векторы смещения имеют всего лишь один компонент, пространственно-развитые амплитуды которых при условии гармонического изменения во времени могут быть представлены следующим образом

$$u_2^{\text{пад}}(x_2) = A_0 e^{i\gamma^{(1)}(x_2 - 2L)}, \quad (1)$$

$$u_2^{\text{отр}}(x_2) = C_0 e^{-i\gamma^{(1)}x_2}, \quad (2)$$

$$u_2^{(2)}(x_2) = D_0 e^{i\gamma^{(2)}x_2}, \quad (3)$$

где A_0 – известная по условию решаемой задачи амплитуда смещений материальных частиц во фронте падающей на электроакустический преобразователь ультразвуковой волны; C_0 и D_0 – константы, подлежащие определению в ходе решения задачи; $\gamma^{(i)} = \omega / \sqrt{E_i / \rho_i}$ ($i = 1, 2$) – волновое число упругих колебаний в i -ой по номеру среде, которая характеризуется модулем Юнга E_i и плотностью ρ_i (ω - круговая частота). Форма записи смещений в тыловой акустической нагрузке (среда 2), которая, как правило, выпол -

няет функции демпфера (стабилизатора характеристик электроакустического преобразователя), предполагает отсутствие отражений от правой границы, что с формальной точки зрения эквивалентно бесконечному удалению этой границы от плоскости $x_2 = -\alpha$.

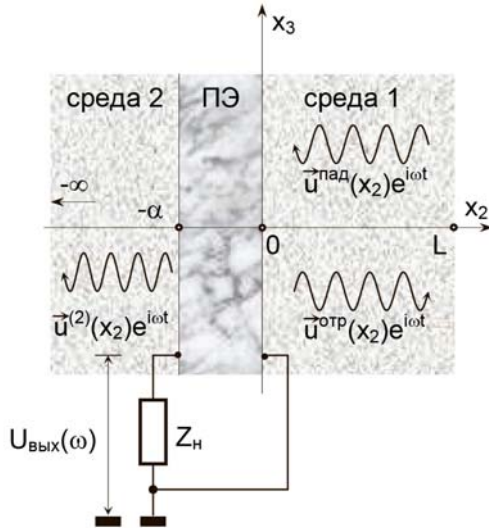


Рис. 2. Расчетная схема объекта

Смещения материальных частиц в пьезоэлектрическом слое определяются выражением

$$u_2^{(0)}(x_2) = A^* \cos \gamma^{(0)} x_2 + B^* \sin \gamma^{(0)} x_2, \quad (4)$$

где A^* и B^* - подлежащие определению константы, а $\gamma^{(0)}$ - волновое число упругих колебаний в пьезоэлектрике.

Для того, чтобы определить величину $\gamma^{(0)}$ рассмотрим напряженно-деформированное состояние пьезоэлектрического слоя.

Упругие и электрические поля в объеме деформируемого пьезоэлектрика определяются так называемыми уравнениями состояния, которые в адиабатическом приближении имеют следующий вид [3]

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^E \epsilon_{kl} - e_{nij} E_n, \quad (5)$$

$$\|e_{q\alpha}\| = \begin{vmatrix} e_1 E_1^0; & e_2 E_1^0; & e_2 E_1^0; & 0; & \frac{e_1 - e_2}{2} E_3^0; & \frac{e_1 - e_2}{2} E_2^0 \\ e_2 E_2^0; & e_1 E_2^0; & e_2 E_2^0; & \frac{e_1 - e_2}{2} E_3^0; & 0 & \frac{e_1 - e_2}{2} E_1^0 \\ e_2 E_3^0; & e_2 E_3^0; & e_1 E_3^0; & \frac{e_1 - e_2}{2} E_2^0; & \frac{e_1 - e_2}{2} E_1^0; & 0 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где α - матричное объединение тензорных индексов i и j .

Для изготовления электроакустических преобразователей, которые работают с использованием толщинных форм колебаний, применя-

$$D_m = e_{msr} \epsilon_{sr} + \chi_{mp}^E E_p, \quad (6)$$

где σ_{ij} - компонент тензора результирующих механических напряжений; c_{ijkl}^E - модуль упругости, измеренный в режиме постоянства напряженности электрического поля (в режиме короткого замыкания); ϵ_{ij} - компонент тензора бесконечно малых деформаций; e_{nij} - компонент тензора пьезомодулей; E_n и D_m - компоненты векторов напряженности и индукции электрического поля внутри деформируемого пьезоэлектрика; χ_{mp}^E - компонент тензора диэлектрической проницаемости зажатого пьезоэлектрика. Для синтетических пьезоэлектриков (пьезоэлектрических керамик) структура матрицы тензора пьезомодулей может быть определена по значениям компонент вектора напряженности поляризующего электрического поля, в котором находится образец в процессе изготовления. Расчет пьезомодулей производится по формуле

$e_{nij} = e_{qnij} E_q^0$, где e_{qnij} - электрострикционные константы (компоненты изотропного тензора четвертого ранга), E_q^0 - компоненты вектора напряженности поляризующего материал керамики электрического поля. Известно [1], что компоненты любого изотропного тензора четвертого ранга выражаются через две линейно независимые константы. Если эти константы обозначить e_1 и e_2 , то $e_{qij} = e_2 E_q^0 \delta_{ij} + \frac{e_1 - e_2}{2} (E_i^0 \delta_{qj} + E_j^0 \delta_{qi})$, где δ_{ij} - символ Кронекера равный единице при равенстве индексов и равный нулю в противном случае. В общем случае, когда вектор \vec{E}^0 имеет произвольную ориентацию, матрица пьезомодулей имеет следующий вид

ются поляризованные по толщине пьезокерамические пластинки. Принимая во внимание показанную на рис.2 ориентацию координатных осей, получаем из общего представления (7) матрицу пьезомодулей поляризованной по толщине пластинки в следующем виде

$$\|e_{q\alpha}\| = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{16} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{34} & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad (8)$$

где $e_{21} = e_{23} = e_2 E_2^0$ и $e_{16} = e_{34} = \frac{e_1 - e_2}{2} E_2^0$.

С учетом определения характера движения материальных частиц в пьезоэлектрике (выражение (4)) и матрицы пьезомодулей (8) уравнения состояния (5) и (6) приобретают вид

$$\sigma_2^{(0)} = c_{22}^E \frac{\partial u_2^{(0)}}{\partial x_2} - e_{22} E_2, \quad (9)$$

$$D_2 = e_{22} \frac{\partial u_2^{(0)}}{\partial x_2} + \chi_2^\varepsilon E_2. \quad (10)$$

При записи компонентов тензоров в соотношениях (9) и (10) как и во всех последующих выкладках используется матричная индексация.

Определим величину E_2 – напряженность электрического поля внутри колеблющегося пьезоэлектрика.

Будем считать пьезоэлектрик идеальным диэлектриком. В рамках теории электричества это положение формализуется записью $\text{div} \vec{D} = 0$, которая применительно к решаемой задаче приобретает более простой вид, а именно $\partial D_2 / \partial x_2 = 0$. Последнее эквивалентно утверждению о том, что величина D_2 не зависит от значений координаты x_2 . С учетом этого обстоятельства проинтегрируем левую и правую части соотношения (10) в пределах от $-\alpha$ до 0, предварительно подставив в левую часть $E_2 = -\text{grad} \phi$, где ϕ - потенциал электрического поля. Выполняя интегрирование, получаем

$$D_2 = \frac{e_{22}}{\alpha} [u_2^{(0)}(0) - u_2^{(0)}(-\alpha)] - \frac{\chi_2^\varepsilon}{\alpha} U_{\text{Вых}}. \quad (11)$$

Для того, чтобы исключить величину $U_{\text{Вых}}$ из соотношения (11) рассмотрим обобщенную эквивалентную схему (рис.3) пьезоэлектрического приемника ультразвуковых колебаний. На этой схеме преобразователь представлен генератором электрического напряжения, который в режиме холостого хода вырабатывает разность электрических потенциалов U_0 . Выходной электрический импеданс преобразователя обозначен на рис.3 символом $Z_{\text{пэ}}$. При подключении электрической нагрузки $Z_{\text{н}}$ в замкнутой электрической цепи протекает электрический ток $I = U_0 / (Z_{\text{пэ}} + Z_{\text{н}})$ и $U_{\text{Вых}} = I Z_{\text{н}} = U_0 Z_{\text{н}} / (Z_{\text{пэ}} + Z_{\text{н}})$. С другой стороны, амплитудное значение электрического тока можно определить через электрическую индукцию следующим образом $I = i\omega S D_2$, где S – площадь электродированных поверхностей пьезоэлектрической пластинки. Принимая во вни-

мание все эти определения, соотношение (11) можно представить в виде

$$\frac{U_0}{i\omega S (Z_{\text{пэ}} + Z_{\text{н}})} = \frac{e_{22}}{\alpha} [u_2^{(0)}(0) - u_2^{(0)}(-\alpha)] - \frac{U_0 \chi_2^\varepsilon Z_{\text{н}}}{\alpha (Z_{\text{пэ}} + Z_{\text{н}})},$$

откуда следует, что

$$U_0 = i\omega C^\varepsilon \frac{e_{22}}{\chi_2^\varepsilon} \frac{[u_2^{(0)}(0) - u_2^{(0)}(-\alpha)]}{(1 + i\omega C^\varepsilon Z_{\text{н}})},$$

и

$$U_{\text{Вых}} = i\omega C^\varepsilon Z_{\text{н}} \frac{e_{22}}{\chi_2^\varepsilon} \frac{[u_2^{(0)}(0) - u_2^{(0)}(-\alpha)]}{(1 + i\omega C^\varepsilon Z_{\text{н}})}, \quad (12)$$

где C^ε - статическая электрическая емкость зажатой пьезоэлектрической пластинки.

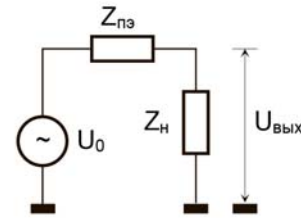


Рис. 3. Обобщенная эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя

Подставляя выражение (12) в соотношение (11), получаем формулу для расчета электрической индукции

$$D_2 = \frac{e_{22}}{\alpha} \frac{[u_2^{(0)}(0) - u_2^{(0)}(-\alpha)]}{(1 + i\omega C^\varepsilon Z_{\text{н}})},$$

после чего из уравнения состояния (10) следует, что

$$E_2 = \frac{e_{22}}{\alpha \chi_2^\varepsilon} \frac{[u_2^{(0)}(0) - u_2^{(0)}(-\alpha)]}{(1 + i\omega C^\varepsilon Z_{\text{н}})} - \frac{e_{22}}{\chi_2^\varepsilon} \frac{\partial u_2^{(0)}}{\partial x_2}. \quad (13)$$

После определения напряженности электрического поля E_2 внутри деформируемой пьезоэлектрической пластинки можно конкретизировать формулу для расчета результирующего механического напряжения $\sigma_2^{(0)}$. Подстановка соотношения (13) в уравнение состояния (9) дает следующий результат

$$\sigma_2^{(0)} = c_{22}^D \frac{\partial u_2^{(0)}}{\partial x_2} - \frac{e_{22}}{\alpha \chi_2^\varepsilon} \frac{[u_2^{(0)}(0) - u_2^{(0)}(-\alpha)]}{(1 + i\omega C^\varepsilon Z_{\text{н}})}, \quad (14)$$

где $c_{22}^D = c_{22}^E + e_{22}^2 / \chi_2^\varepsilon = c_{22}^E (1 + K^2)$ - модуль упругости пьезоэлектрической пластинки при разомкнутой электрической цепи, т. е. в режиме холостого хода электроакустического преобра-

зователя. Символом $K = \sqrt{e_{22}^2/\chi_2^\varepsilon}$ обозначен коэффициент электромеханической связи в режиме толщинных колебаний пьезоэлектрической пластинки.

Уравнение установившихся гармонических колебаний малого объема упруго деформируемой среды в отсутствии распределенных в объеме внешних сил имеет, как известно [2], следующий вид $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho_0 \omega^2 u_i = 0$. Применительно к

решаемой задаче это общее соотношение необходимо записать в виде

$$\frac{\partial \sigma_2^{(0)}}{\partial x_2} + \rho_0 \omega^2 u_2^{(0)} = 0. \quad (15)$$

Выражение (4) является решением уравнения (15) в том случае, когда $\gamma^{(0)} = \omega / \sqrt{c_{22}^D / \rho_0}$.

После определения волнового числа $\gamma^{(0)}$ можно приступить к вычислениям констант A^* , B^* , C_0 и D_0 , которые характеризуют амплитудные значения смещений материальных частиц в пьезоэлектрической пластине, в отраженной ультразвуковой волне и в материале тыловой акустической нагрузки. Эти константы находятся из условий кинематического и динамического сопряжения напряженно-деформированного состояния на границах раздела сред. Условия кинематического сопряжения являются формальной записью вполне закономерного предположения о том, что при малых амплитудах смещений материальных частиц не происходит разрывов сплошности сред, т. е. не образуются пустоты, и материальные частицы одной среды не проникают в объем, который занимают материальные частицы другой среды. Для показанной на рис.2 расчетной схемы эти условия записываются следующим образом

$$\begin{aligned} u_2^{(2)}(x_2) \Big|_{x_2=-\alpha} &= u_2^{(0)}(x_2) \Big|_{x_2=-\alpha}, \\ u_2^{(0)}(x_2) \Big|_{x_2=0} &= [u_2^{\text{пад}}(x_2) + u_2^{\text{отр}}(x_2)] \Big|_{x_2=0} \end{aligned} \quad (16)$$

Условия динамического сопряжения представляют собой третий закон Ньютона в дифференциальной форме и записываются в виде

$$\begin{aligned} \sigma_2^{(2)}(x_2) \Big|_{x_2=-\alpha} &= \sigma_2^{(0)}(x_2) \Big|_{x_2=-\alpha}, \\ \sigma_2^{(0)}(x_2) \Big|_{x_2=0} &= \sigma_2^{(1)}(x_2) \Big|_{x_2=0} \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\sigma_2^{(2)} = E_2 \frac{\partial u_2^{(2)}}{\partial x_2} = i\gamma^{(2)} E_2 D_0 e^{i\gamma^{(2)} x_2};$$

$$\begin{aligned} \sigma_2^{(0)}(x_2) &= c_{22}^D \gamma^{(0)} \left[A^* (-\sin \gamma^{(0)} x_2 - \beta_1) + \right. \\ &\quad \left. + B^* (\cos \gamma^{(0)} x_2 - \beta_2) \right]; \end{aligned}$$

$$\beta_1 = \frac{K^2 (1 - \cos \gamma^{(0)} \alpha)}{(1 + K^2)(1 + i\omega C^\varepsilon Z_H) \gamma^{(0)} \alpha};$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_1 \sin \gamma^{(0)} \alpha}{(1 - \cos \gamma^{(0)} \alpha)};$$

$$\sigma_2^{(1)} = E_1 \frac{\partial}{\partial x_2} [u_2^{\text{пад}}(x_2) + u_2^{\text{отр}}(x_2)] =$$

$$= i\gamma^{(1)} E_1 \left(A_0 e^{i\gamma^{(1)}(x_2 - 2L)} - C_0 e^{-i\gamma^{(1)} x_2} \right).$$

Очевидно, что условия (16) и (17) образуют систему из четырех линейных алгебраических уравнений, в которых содержится четыре неизвестных величины A^* , B^* , C_0 и D_0 . Эта система имеет единственное решение; искомые константы определяются следующими соотношениями:

$$A^* = 2iA_0 e^{-2i\gamma^{(1)}L} \frac{\xi_1}{\Delta_0^*} (\cos \gamma^{(0)} \alpha - \beta_2 + i\xi_2 \sin \gamma^{(0)} \alpha),$$

$$B^* = -2iA_0 e^{-2i\gamma^{(1)}L} \frac{\xi_1}{\Delta_0^*} (\sin \gamma^{(0)} \alpha - \beta_1 - i\xi_2 \cos \gamma^{(0)} \alpha),$$

$$\begin{aligned} C_0 &= A_0 \frac{e^{-2i\gamma^{(1)}L}}{\Delta_0^*} [(i\xi_1 + \beta_1)(\cos \gamma^{(0)} \alpha - \beta_2 + \\ &\quad + i\xi_2 \sin \gamma^{(0)} \alpha) + (1 - \beta_2)(\sin \gamma^{(0)} \alpha - \beta_1 - \\ &\quad - i\xi_2 \cos \gamma^{(0)} \alpha)] \end{aligned}$$

$$D_0 = e^{i\gamma^{(2)}\alpha} (A^* \cos \gamma^{(0)} \alpha - B^* \sin \gamma^{(0)} \alpha).$$

После определения искоемых констант не составляет труда определить коэффициент отражения от границы раздела $x_2 = 0$ и разность электрических потенциалов на электрическом выходе преобразователя в режиме регистрации падающей ультразвуковой волны.

Очевидно, что коэффициент отражения

$$K_{\text{отр}} = \frac{u_2^{\text{отр}}(x_2) \Big|_{x_2=0}}{u_2^{\text{пад}}(x_2) \Big|_{x_2=0}} \text{ и поэтому можно записать}$$

$$\begin{aligned} K_{\text{отр}} &= \frac{1}{\Delta_0^*} [(i\xi_1 + \beta_1)(\cos \gamma^{(0)} \alpha - \beta_2 + i\xi_2 \sin \gamma^{(0)} \alpha) + \\ &\quad + (1 - \beta_2)(\sin \gamma^{(0)} \alpha - \beta_1 - i\xi_2 \cos \gamma^{(0)} \alpha)] \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя в формулу (12) значения коэффициентов A^* и B^* , получаем

$$U_{\text{Вых}} = A_0 e^{-i2\gamma^{(1)}L} W^\varepsilon(\omega), \quad (19)$$

где $W^\varepsilon(\omega)$ – коэффициент передачи пьезоэлектрического преобразователя с механической на электрическую сторону, причем

$$W^\varepsilon(\omega) = 2i \frac{\xi_1 e_{22}}{\chi_2^\varepsilon} \cdot \frac{i\omega C^\varepsilon Z_H}{1 + i\omega C^\varepsilon Z_H} \cdot \frac{F(\gamma^{(0)}\alpha)}{\Delta_0^*}, \quad (20)$$

$$F(\gamma^{(0)}\alpha) = (1 - \cos \gamma^{(0)}\alpha)(\cos \gamma^{(0)}\alpha - \beta_2 + i\xi_2 \sin \gamma^{(0)}\alpha) - \sin \gamma^{(0)}\alpha(\sin \gamma^{(0)}\alpha - \beta_1 - i\xi_2 \cos \gamma^{(0)}\alpha).$$

2. Исследование полученных результатов

Рассмотрим физическое содержание полученных результатов.

На рис.4. представлены графики зависимости модуля коэффициента отражения от границы раздела пьезокерамика ЦТС-19 – исследуемое твердое тело, рассчитанные по формуле (18) в предположении, что относительный акустический импеданс фронтальной акустической нагрузки (исследуемой среды) $\xi_1 = 0,95$, а относительный импеданс тыловой акустической нагрузки ξ_2 меняется в пределах от 0 до 1,5. При вычислениях предполагалось, что потери энергии в пьезокерамике отсутствуют, т. е. добротность $Q \rightarrow \infty$. Произведение $\omega C^\varepsilon Z_H = (\omega\alpha/v^D)\tau_3(v^D/\alpha) = \gamma^{(0)}\alpha\tau_3/\tau_0$, где $\tau_3 = C^\varepsilon Z_H$, а $\tau_0 = \alpha/v^D$. Характер электрической нагрузки преобразователя определяется отношением τ_3/τ_0 . При $\tau_3/\tau_0 \rightarrow 0$ реализуется режим короткого замыкания, а при $\tau_3/\tau_0 \rightarrow \infty$ - режим холостого хода. При вычислениях, результаты которых показаны на рис.4, было принято $\tau_3/\tau_0 = 10$, что соответствует режимам, которые практически легко обеспечиваются.

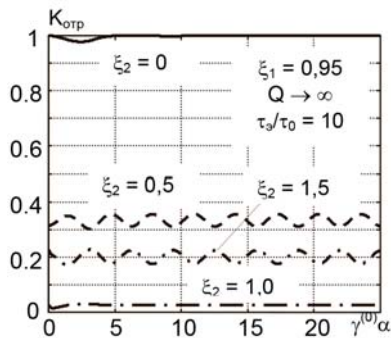


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от акустического импеданса тыловой акустической нагрузки

Из представленных на рис.4 результатов следует вывод – электроакустический преобразователь для измерения коэффициентов затухания ультразвуковых волн не должен иметь тыловой акустической нагрузки.

На рис.5 показаны результаты вычисления модуля коэффициента отражения для пьезокерамики ЦТС-19 для значений $\xi_1 = 0,95$ и $\xi_2 = 0$. Добротность пьезоэлектрика по-прежнему принимается бесконечно большой. Варьируемым параметром в этой серии расчетов выступает отношение τ_3/τ_0 , которое изменяется от значений соответствующих короткому замыканию до значений присущих режиму холостого хода. Как и следовало ожидать, коэффициент отражения резко уменьшается при приближении к режиму короткого замыкания и возрастает по мере увеличения параметра τ_3 . Физическая причина этого в достаточной мере очевидна – с ростом значений Z_H все меньшая часть энергии падающей ультразвуковой волны трансформируется в электрический ток, активная составляющая которого безвозвратно рассеивается в виде тепла на нагрузочном сопротивлении.

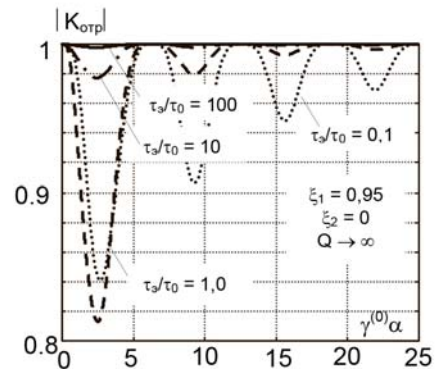


Рис.5. Зависимость модуля коэффициента отражения от параметров электрической нагрузки преобразователя

Из сравнения кривых, приведенных на рис.5 следует вывод, что электрическая нагрузка электроакустического преобразователя, который используется для измерения коэффициентов затухания ультразвуковых волн в твердых телах, должна определяться из условия $|Z_H| > 10\tau_0/C^\varepsilon$, где C^ε - статическая электрическая емкость электродированной пьезоэлектрической пластинки.

На рис.6 показаны изменения модуля коэффициента отражения, которые определялись для тех же значений электрической нагрузки, что и кривые, приведенные на рис.5. Отличие заключается в том, что при выполнении расче-

тов была принята реальная добротность пьезо-керамики $Q = 80$ [6].

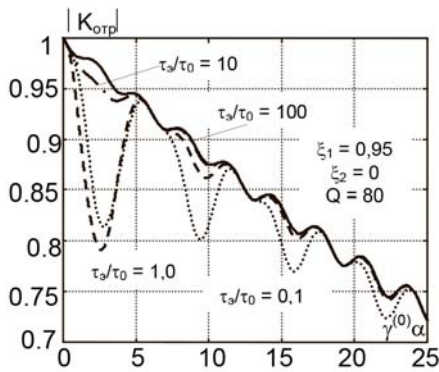


Рис.6. Зависимость модуля коэффициента отражения для пьезокерамики с добротностью $Q = 80$ от параметров электрической нагрузки преобразователя

Обращает на себя внимание факт, что даже в режиме холостого хода ($\tau_3/\tau_0 = 100$) наблюдается существенное уменьшение числовых значений модуля коэффициента отражения с ростом безразмерного волнового числа $\gamma^{(0)}\alpha$. На высоких частотах ($\gamma^{(0)}\alpha > 12$) влияние потерь в пьезокерамике приобретает доминирующее значение и характерные различия между режимами короткого замыкания и холостого хода нивелируются. Таким образом, основным фактором, оказывающим влияние на изменение коэффициента отражения, является низкая добротность пьезокерамики. Слишком значительная часть энергии падающей ультразвуковой волны безвозвратно рассеивается в виде тепла в объеме пьезоэлектрической пластинки.

На рис.7 показано частотно-зависимое изменение модуля коэффициентов отражения для многократно отраженной ультразвуковой волны. Сплошная кривая на рис.7 соответствует случаю, когда ультразвуковая волна претерпела четырехкратное отражение от границы раздела пьезоэлектрик – исследуемая среда, штриховая кривая соответствует восьми последовательным отражениям и т. д. Отчетливо видно, что по мере увеличения номера отражения возрастает подавление высокочастотных гармоник в частотном спектре ультразвуковой волны, падающей на границу раздела двух сред. Частотные искажения, вносимые пьезоэлектрической пластинкой в спектр ультразвуковой волны, проявляются во временной области существования сигнала в виде искажения формы импульса – импульсный сигнал растягивается во времени и уменьшается по амплитуде. Следует подчеркнуть, что уменьшение амплитуды обусловлено как потерями энергии падающей ультразвуко-

вой волны в объеме пьезоэлектрической пластинки, так и увеличением доли низкочастотных спектральных компонентов в спектре импульсного сигнала, что приводит к увеличению его длительности. На рис.8 показаны формы импульсных сигналов на механической стороне электроакустического преобразователя. Временная диаграмма с номером $k = 0$ соответствует импульсу смещений материальных частиц в падающей на границу $x_2 = 0$ ультразвуковой волне. Номера $k = 5, 10, 15$ и 20 соответствуют пятому, десятому, пятнадцатому и двадцатому отражению. Расчеты временных диаграмм, показанных на рис.8, производились для следующего набора параметров: пьезокерамика ЦТС-19, $Q = 80$, $\xi_1 = 0,95$, $\xi_2 = 0$, $\tau_3/\tau_0 = 10$, центральная частота в спектре импульсного сигнала $\Omega_0 = \pi/\tau_0$. Масштабные единицы по горизонтали и вертикали для всех временных диаграмм одинаковы.

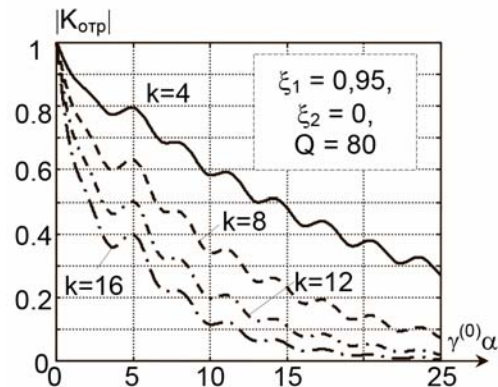


Рис. 7. Зависимость модуля коэффициента отражения от номера отражения k

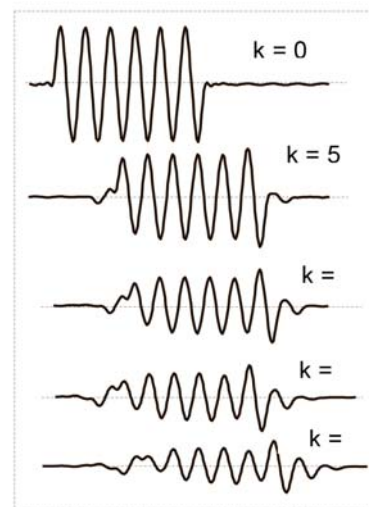


Рис. 8. Зависимость формы импульсов смещения материальных частиц исследуемой среды от номера отражения k

Отчетливо видно, что даже при отсутствии поглощения энергии упругих колебаний в исследуемой среде взаимодействие падающей ультразвуковой волны с пьезоэлектрической пластинкой приводит к определенным энергетическим потерям, которые могут быть интерпретированы как поглощение энергии упругих колебаний в исследуемой среде.

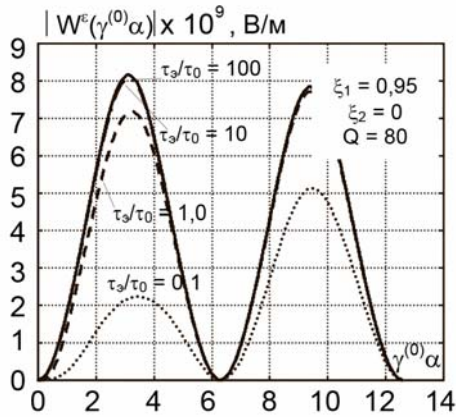


Рис. 9. Зависимость модуля коэффициента передачи приемника ультразвуковых колебаний от параметров электрической нагрузки преобразователя

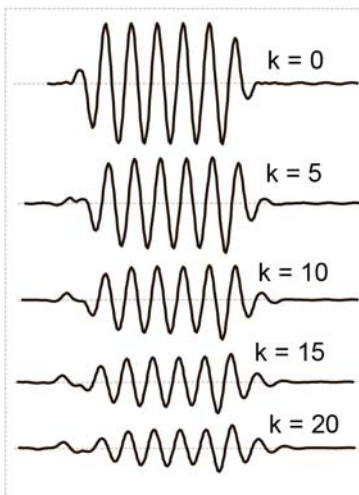


Рис.10. Зависимость формы сигнала на электрической стороне преобразователя от номера отражения.

Так как пьезоэлектрический преобразователь имеет частотную характеристику типа полосового фильтра (на рис.9 показаны графики изменения модуля функции $W^e(\omega)$, рассчитанные по формуле (20) для пьезокерамики ЦТС-19), то перестройки в спектре отраженных импульсных сигналов приводят к дополнительным изменениям уровней сигналов на электрической стороне преобразователя. На рис.10 показаны

временные диаграммы сигналов на электрическом выходе преобразователя (на нагрузочном сопротивлении Z_H), которые соответствуют временным диаграммам, показанным на рис.8. Видно, что на электрической стороне преобразователя с ростом номера отражения происходит более быстрое падение уровней сигнала.

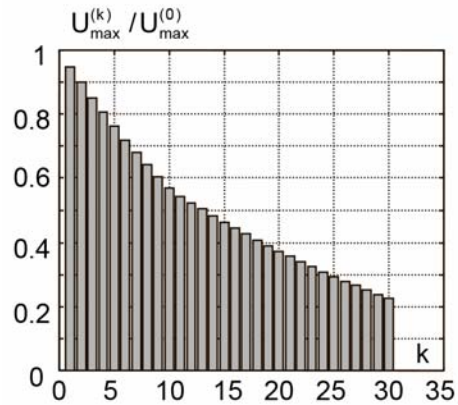


Рис. 11. Уменьшение максимальных значений сигнала на электрической стороне преобразователя с ростом номера отражения

На рис.11 показана гистограмма максимальных значений сигнала на электрической стороне преобразователя для различных номеров отраженных импульсов. Отчетливо видно почти что экспоненциальное убывание уровней сигналов, которое может быть интерпретировано как поглощение энергии упругих колебаний в исследуемой среде. На самом деле это затухание вносится в результаты измерений электроакустическим преобразователем, и это вносимое затухание следует расчетным путем отделять от измеряемого поглощения энергии в исследуемой среде.

Выводы

Основные результаты настоящей работы можно сформулировать следующим образом.

1. На конкретном примере практического использования ультразвукового преобразователя показано, что результаты выполненных с его помощью измерений должны подвергаться дополнительной обработке с целью исключения влияния измерительного прибора на количественные значения результатов измерения.
2. Использование электроакустических преобразователей «в слепую», т. е. без знания их передаточных характеристик, практически полностью девальвирует достоверность полученные с их помощью результаты.
3. Использование пьезокерамики в электроакустических преобразователях, которые пред-

назначаются для измерений коэффициентов затухания ультразвуковых колебаний в твердых телах, является крайне нежелательным, так как пьезокерамика имеет весьма значительный уровень собственных потерь и это вносит существенные искажения в результаты измерений.

Список использованных источников

1. *Racah G.* Determinazione del numero dei tensori isotropi indipendenti di rango n . - Rend. Acad. Linc. 1933. 6. 17. P. 386 - 389.
2. *Новацкий В.* Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
3. *Новацкий В.* Электромагнитные эффекты в твердых телах. – М.: Мир, 1986. – 160 с.
4. *Пападакис Э.* Затухание ультразвука, обусловленное рассеянием в поликристаллических средах. - В кн. Физическая акустика. Т IV, Ч.Б. Применения физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела. – М.: Мир, 1970. С. 317 – 381.
5. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 307 с.
6. Физические величины. Справочник/ А.П. Бабичев, Н.Л. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, е.з. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Поступила в редакцию 30 января 2014 г.

УДК 534.286-8:534.232.082.73

Н.В. Богданова, канд. техн. наук, **О.М. Петрищев**, д-р. тех. наук

Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Оцінка загасання, що вноситься п'єзоелектричним перетворювачем при вимірюваннях коефіцієнтів поглинання енергії ультразвукових коливань у пружних середовищах

На прикладі стандартного методу вимірювання коефіцієнтів загасання ультразвукових хвиль розглядається актуальне для сучасної акустотехніки питання про вплив вимірювального приладу на результати вимірювання. Показано, що при обробці результатів вимірювання в обов'язковому порядку необхідно враховувати передавальні характеристики використовуваного ультразвукового перетворювача. Ігнорування цієї вимоги може привести до грубих помилок, які можуть скласти основу для помилкових висновків щодо якісних характеристик досліджуваного матеріалу. Останнє переконливо показано на модельному прикладі. Бібл. 6, рис. 11.

Ключові слова: коефіцієнт загасання, акустичні вимірювання, передавальна характеристика, електроакустичний перетворювач, ультразвук.

UDC 534.286-8:534.232.082.73

N.V. Bogdanova, Ph.D., **O.N. Petryshev**, Dr.Sc.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnichna, 16, Kyiv, 03056, Ukraine.

Assessment of attenuation of piezoelectric transducer for measurements of energy absorption coefficients of ultrasonic vibrations in elastic media

On an example of a standard measurement method of attenuation coefficients of ultrasonic waves is considered relevant question of the modern acoustic technique about the influence of the measuring device on the measurement results. It is shown that in processing of measurement is necessary to take into account the transmission characteristics of the ultrasonic used transducer. Failure to do so can lead to

serious errors, which can be the basis for the false statements regarding the quality characteristics of the test material. Last convincingly demonstrated on a model. References 6, figures 11.

Keywords: *attenuation coefficient, acoustic measurements, transfer characteristic, electroacoustic transducer, ultrasound.*

References

1. *Racah G.* Determinazione del numero dei tensori isotropi indipendenti di rango n . - Rend. Acad. Linc. 1933. 6. 17. P. 386 - 389. (Ital)
2. *Novatskiy V.* (1975), «Theory of Elasticity». Moscow, Mir. P. 872. (Rus)
3. *Novatskiy V.* (1986), «Electromagnetic effects in solids». Moscow, Mir. P. 160. (Rus)
4. *Papadakis E.* (1970), "Ultrasonic attenuation due to scattering in polycrystalline media". Physical Acoustics. Vol. IV, Ch.B. "Application of physical acoustics in quantum physics and solid state physics" Moscow, Mir. Pp. 317 – 381. (Rus)
5. *Truell R., Elbaum C., Chick B.* (1972), "Ultrasonic Methods in Solid State Physics". Moscow, Mir. P. 307. (Rus)
6. *A.P. Babichev, N.L. Babushkina, A.M. Bratkovskiy and others* (1991), "Physical quantities. Directory". Moscow, Energoatomizdat. P. 1232. (Rus)