

КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

УДК 534.21:534.8:681.2

МОДЕЛЬ ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

Шевченко А. И.

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, г. Киев, Украина

E-mail: soi_51@ukr.net

В статье приведена схема прохождения и измерения ультразвука через исследуемый образец посредством двух преобразователей – источника и приёмника ультразвука. Приведена схема расположения образца и преобразователей в модели четырехполюсников. Использование электроакустических четырехполюсников в практической работе позволяет применить методики и теорию электрических цепей. Приведены размерности пьезоэлектрических постоянных в системах СИ и СГС, несоответствия размерности физических величин при разных подходах в определении физических величин в электротепловой аналогии. Проанализировано соблюдение размерности в уравнения упругости для пьезокристалла в зависимости от значений физических величин в электроакустической аналогии. Приведено уравнение измерений.

Ключевые слова: ультразвук, преобразователь, электроакустическая аналогия, электрические четырехполюсники, размерность пьезоэлектрических постоянных, уравнения упругости для пьезокристаллов.

Вступление

В настоящее время при контроле дефектов в материалах широко используются аналитические методы решения уравнения упругости для проходящей ультразвуковой (УЗ) волны, понятия акустического поля преобразователя, зоны Гюйгенса-Френеля, диаграммы направленности, виды акустических волн [1] и др.

В то же время, широко применявшиеся несколько десятилетий назад методы электроакустической аналогии, акустических четырехполюсников и эквивалентных схем в последние годы исследователями незаслуженно забыты. Эти методы широко используются в электротехнике. Есть обширные наработки, и их применение к акустике может расширить методический аппарат ультразвукового контроля.

В тоже время, в работах по акустическим четырехполюсникам у разных авторов присутствуют не совпадающие термины и условные обозначения. Следует отметить, и отсутствие стандартизации в обозначениях физических величин (ФВ), и их параметров, что затрудняет сравнение выкладок исследований.

Исследование

В работе предложены подходы к уравнению измерений для контроля механических характеристик материалов с использованием модели электроакустических четырехполюсников.

В работе рассматривается механизм прохождения УЗ волны в трехслойной пластине, состоящей из: 1 – преобразователя-источника УЗ; 2 – исследуемого образца; 3 – преобразователя-приемника УЗ. Схема расположения пластин указана на рис 1.

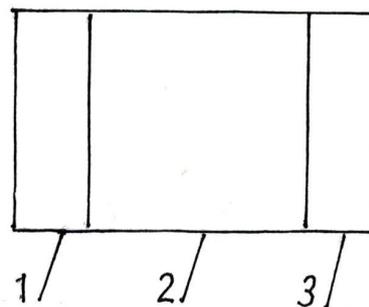


Рис. 1 Расположение преобразователей и исследуемого образца при контроле

В соответствии с [2] приведем в матричной форме одномерные уравнения, связывающие механическое напряжение T и деформацию S с напряженностью электрического поля E и электрическим смещением D для пьезоэлемента с поперечной поляризацией (табл. 1 [3]).

В табл. 1 представлены определения единиц ФВ и их размерности по нескольким источникам. Также D определяется как свободный заряд на единицу поверхности (поверхностная плотность

электрического заряда). Сами УЗ колебания являются продольными [4]. Для лучшего восприятия все буквенные обозначения физических величин и их размерности представлены в таблице 1.

Для описания пьезокристаллических явлений при продольных колебаниях в [4] выбраны функции:

$$\xi = \xi(\tau, P), \quad (1)$$

$$P = P(E, \xi), \quad (2)$$

где: P – электрическая поляризация (табл. 1); ξ – механическая (пьезоактивная) деформация;

Полные дифференциалы уравнений (1), (2) равны [3]:

$$\Delta\xi = \left(\frac{\partial\xi}{\partial\tau}\right)_E \cdot \Delta T + \left(\frac{\partial\xi}{\partial E}\right)_\tau \cdot \Delta E, \quad (3)$$

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial\tau}\right)_E \cdot \Delta T + \left(\frac{\partial P}{\partial E}\right)_\tau \cdot \Delta E, \quad (4)$$

где $\Delta\xi$ – добавочная деформация [$\Delta\xi$] = м; τ – время, [τ] = с.

Выберем уравнение с константой d (уравнение, в котором независимые переменные: поле – механическое напряжение) [4]: $d = (S/E)_T$; d – пьезоэлектрическая константа деформации, определяется как отношение пьезоэлектрической деформации S к вызывающему ее электрическому полю E в механически свободном пьезоэлектрическом веществе ($T = 0$).

Непосредственно из уравнений (3), (4) путем преобразований получается в алгебраической [2] форме имеет вид [5]:

$$S_1 = s_{11} \cdot T_1 + d_{31} \cdot E_{03} \quad (5)$$

$$D_3 = d_{31} \cdot T_1 + \varepsilon_{33}^T \cdot E_{03} \quad (6)$$

s_{11} – относительное удлинение (деформация); ε_{33}^T = диэлектрическая проницаемость; g – пьезоэлектрическая постоянная, $d_{31} = \varepsilon_{33}^T \cdot g$; модуль упругости (Юнга) $Y_{11}^E = 1/s_{11}^E$.

Считаем электрическую сторону (E , D) четырехполюсника входом, а механическую (T , S) – выходом четырехполюсника.

Уравнения (5), (6) соответствуют матричной Y – форме четырехполюсника при электроакустической аналогии:

$$\begin{matrix} \parallel I_1 \parallel \\ I_2 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} \parallel U_2 \parallel \\ U_1 \end{matrix}.$$

Для упрощения записи матричная форма в статье изложена следующим образом:

$(I_1, I_2) \rightarrow (U_1, U_2)$, где U_1, I_1 – напряжение и ток на входе четырехполюсника; U_2, I_2 – напряжение и ток на выходе четырехполюсника.

$$\|S\| = \|s^E\| \cdot \|T\| + \|d\|_i \cdot \|E\|, \quad (7)$$

$$\|D\| = \|d\| \cdot \|T\| + \|\varepsilon^T\| \cdot \|E\|, \quad (8)$$

$$T \lll E, S \lll D$$

$$(S, D) = (T, E),$$

где деформация $S = \xi/x$, x – пространственная координата, [x] = м/

Значок \lll схематически отражает те же соответствия между ФВ, что и в уравнениях (7) – (10).

Подставим размерности в уравнения (7), (8) в системе СИ; и в уравнениях (9), (10) в системе СГС:

$$[S][1] = [s^E][\text{м}^2/\text{Н}] \times [T][\text{Н}/\text{м}^2] + [d][\text{Кл}/\text{Н}] \times [E][\text{В}/\text{м}]; \quad (9)$$

$$[D][\text{Кл}/\text{м}^2] = [d][\text{Кл}/\text{Н}] \times [T][\text{Н}/\text{м}^2] + [\varepsilon^T][\text{Ф}/\text{м}] \times [E][\text{В}/\text{м}]. \quad (10)$$

$$[S][1] = [s^E][\text{см} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^2] \times [T][\text{см}^{-1} \cdot \text{г} \cdot \text{с}^{-2}] + [d][\text{см}^{1/2} \cdot \text{г}^{-1/2} \cdot \text{с}^1] \times [E][\text{см}^{-1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}]; \quad (11)$$

$$[D][\text{см}^{-1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}] = [d][\text{см}^{1/2} \cdot \text{г}^{-1/2} \cdot \text{с}^1] \times [T][\text{см}^{-1} \cdot \text{г} \cdot \text{с}^{-2}] + [\varepsilon^T][1] \times [E][\text{см}^{-1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}]. \quad (12)$$

Обозначения в предыдущих формулах (9) – (12) следует рассматривать таким образом: приведены по две пары выражений в квадратных скобках: в первой скобке – ФВ; во второй скобке – выражение единицы ФВ через основные единицы СИ или СГС.

Для второго преобразователя в качестве независимых переменных возьмем S и D .

Считаем, механическую сторону входом четырехполюсника, а электрическую – выходом.

Уравнение электроакустики для такого случая запишется следующим образом [5]:

$$T = c^D \cdot S - h_t \cdot D, \quad (13)$$

$$E = -h \cdot S + \beta^S \cdot D. \quad (14)$$

где h, h_t – компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов, t – означает транспонированную матрицу.

Эти уравнения соответствуют [5]: Z – форме четырехполюсника ($U_1, U_2 \rightarrow I_1, I_2$). Проставим размерности в уравнениях (15), (16) в системе СИ; и в уравнениях (17), (18) в системе СГС:

$$[T][\text{Н}/\text{м}^2] = [c^D][\text{Н}/\text{м}^2] \times [S][1] + [h_t][\text{Н}/\text{Кл}] \times [D][\text{Кл}/\text{м}^2] \quad (15)$$

$$[E][\text{В}/\text{м}] = [h][\text{Н}/\text{Кл}] \times [S][1] + [\beta^S][1] \times [D][\text{Кл}/\text{м}^2] \quad (16)$$

$$[T][\text{дин}/\text{см}^2][\text{см}^{-1} \cdot \text{г} \cdot \text{с}^{-2}] = [c^D][\text{см}^{-1} \cdot \text{г} \cdot \text{с}^{-2}] \times [S][1] + [h_t][\text{см}^{-1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}] \times [D][\text{см}^{-1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}] \quad (17)$$

$$[E][\text{см}^{-1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}] = [h][\text{см}^{-1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}] \times [S][1] + [\beta^S][1] \times [D][\text{см}^{-1/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}] \quad (18)$$

Уравнение движения (волновое уравнение) для пьезоэлемента через механическое перемещение ξ записывается [2]:

$$Y_{11}^E \cdot \partial^2 \xi / \partial x^2 = \rho \cdot \partial^2 \xi / \partial \tau^2, \quad (19)$$

где c^D – компоненты тензора модулей упругости, измеренные при постоянной индукции D ; z – пространственная координата; τ – время.

Решение такого уравнения для гармонического во времени колебания имеет вид [2, 5, 6]:

$$\xi = (B_1 \cdot \sin \gamma x + B_2 \cdot \cos \gamma x) \cdot e^{j\omega t};$$

$$v = \partial \xi / \partial \tau = j\omega \xi,$$

$$S_1 = \partial \xi / \partial x = \beta (B_1 \cdot \sin \beta x + B_2 \cdot \cos \beta x) \cdot e^{j\omega t},$$

где v – скорость; ω – круговая частота; γ – постоянная распространения волн при отсутствии затухания:

$$\gamma = j\omega \sqrt{\rho/Y^D} = j\omega/c = j\beta,$$

$$\beta = \omega/c, c = \sqrt{\frac{Y^E}{\rho}},$$

где ρ – плотность материала пьезокристалла, c – фазовая скорость.

В книге Шарапова В. М. [2] в результате решения уравнения (19) получают выражения для физической силы F и скорости u . Силы F и скорость u являются входом для четырехполюсника пластины (образец 2). Формулы для силы F и скорости u получают посредством несложных расчетов. Силы, действующие на концах преобразователя 1: F_1 – на входе, и F_2 ; скорости соответственно u_1 – на входе пластины; и u_2 – на выходе пластины.

Решения уравнения (13) приведены в работах [4, 7, 8, 12]. Уравнения (7), (8) для 1-го преобразователя-источника соответствуют Y – форме четырехполюсника ($I_1, I_2 \rightarrow U_1, U_2$) по [2]) соответствуют 4-му уравнению по Маркевичу А. А. [7]), и также Y – форма четырехполюсника. Четвертое уравнение [7] при поперечной поляризации [2] имеет вид:

$$q = C_F V + k_4 \cdot d \cdot F \quad (20)$$

$$u = -k_4 \cdot d \cdot V + 1/s_V \cdot F \quad (21)$$

В этих двух уравнениях (5), (6) [2], для 1-го преобразователя в качестве собственного параметра выбирается емкость C_F при отсутствии силы (когда внешние силы не препятствуют смещению подвижной обкладки), $C_F = q/V|_{F=0}$.

Собственная емкость включена параллельно по отношению к элементам схемы, отображающим механическую реакцию, 2-ое уравнение [7].

В двух уравнениях (13), (14) [5], для 2-го преобразователя, которые соответствуют 1-ой форме (1-ое уравнение по Харкевичу А. А.), тоже (Z-форма четырехполюсника ($U^3_1, U^3_2 \rightarrow I^3_1, I^3_2$) – продольная поляризация) в качестве собственного параметра выбирается емкость при отсутствии смещения C_u : $1/C_u = V/q|_{u=0}$.

При этом, если собственная емкость включена последовательно элементам схемы, отображающим механическую реакцию

$$V = 1/C_u \cdot q + k_1 \cdot f \cdot u, \quad (22)$$

$$F = -k_1 \cdot f \cdot q + s_q \cdot u. \quad (23)$$

Пьезоэлектрический коэффициент $f = E/\xi|_{D=0} = \sigma/\tilde{D}|_{\xi=0}$; $c_{22} = s_q = F/u = |_{q=0}$ упругость холостого хода при разомкнутой электрической цепи, где c_{22} – четвертый коэффициент в матрице из двух уравнений.

Когда направление электрических и механических полей совпадают для однородных деформаций $k_1 = 1$ [7]. В расчетную формулу должны быть подставлены фактические значения линейных размеров для каждого образца

У Харкевича А. А. [7]: $F \blacktriangleleft V, q \blacktriangleleft u$. Но в основных формулах у Шарапова В. М. [2] следующее соответствие на входе и выходе четырехполюсника: $T \blacktriangleleft E, S \blacktriangleleft D$. При этом, чтобы получить соответствие в этих двух подходах, механической силы – электрическому напряжению: $F \blacktriangleleft V$ (по электроакустической аналогии) нужно размерность механического напряжения T помножить на «м²», тогда получится размерность силы F . А размерность электрической напряженности E следует помножить на «метр», тогда получится размерность напряжения U . Чтобы получить соответствие «перемещения – заряду»: $u \blacktriangleleft q$, нужно u помножить размерность деформации S на «метр», тогда получится u , а размерность плотности заряда D помножить на «м²», тогда получится размерность заряда q :

$$F \blacktriangleleft V, q \blacktriangleleft u, (q, u) = (F, V).$$

Получается нестыковка в размерностях в обоих подходах, т.е. ФВ, которые соответствуют величинам в основных формулах преобразователя, не соответствуют электроакустической аналогии. Тогда нарушается соответствие размерностей в левой и правой частях равенств в основных формулах (22), (23). Вывод: размерности в формулах у Шарапова В. М. [2] в левой и правой частях соответствующих уравнений для пьезокристалла совпадают, следовательно, более адекватен подход для электроакустической аналогии, представленной в формулах [2].

Для исследуемого образца (рис. 1) использована матричная (B-форма четырехполюсника, ($U^2_1, I^2_1 \rightarrow U^2_2, I^2_2$)). Воспользуемся электроакустической аналогией для четырехполюсника:

$$U_2 = B_{11} \cdot U_1 + B_{12} \cdot I_1, \quad (24)$$

$$I_2 = B_{21} \cdot U_1 + B_{22} \cdot I_1. \quad (25)$$

Заменяя U_2 (напряжение) на F_2 (силу), а I_2 (ток) на v_2 (скорость) по электроакустической аналогии получим:

$$F_2 = B_{11} \cdot F_1 + B_{12} \cdot v_1,$$

$$v_2 = B_{21} \cdot F_1 + B_{22} \cdot v_1.$$

Эти формулы являются промежуточным звеном уравнения измерений в матричной форме для исследуемого образца 2 (рис. 1).

Составной четырехполюсник [2, 10, 14] состоит из трех слоев: 1 – преобразователь-источник

УЗ; 2 – досліджуєму образці; 3 – преобразователь-приемник УЗ.

Матричне фізичне рівняння для всієї системи наступне:

$$\|S^{(n)}_{ij}\| = \|P^{(1)}_{ij}\| \cdot \|P^{(2)}_{ij}\| \cdot \|P^{(3)}_{ij}\|, \quad (26)$$

де n – загальне число шарів, в даному випадку $n = 3$.

Рівняння (26) є передаточна функція в рівнянні вимірювання в матричній формі для всієї ланки проходження ультразвукового сигналу.

Для досліджуєму образці 2 матричне рівняння записується:

$$\|P^{(2)}_{ij}\| = \begin{vmatrix} \operatorname{ch} \gamma_2 l_2 & A_1 z_2 \operatorname{sh} \gamma_2 l_2 \\ \frac{\operatorname{sh} \gamma_2 l_2}{A_1 z_2} & \operatorname{ch} \gamma_2 l_2 \end{vmatrix}.$$

Таблиця 1. Визначення величин, їх розмірності та одиниць (Мезон У., Сена Л. А) [3, 8, 13]

Назва величин	Символ	Розмірність в системі СГСЕ	Розмірність в системі СИ	Найменування та визначення в одиницях СГСЕ	Найменування та визначення в одиницях СИ, виражені через основні одиниці СИ
1	2	3	4	5	6
Сила	F	$\dim F = LMT^{-2}$	$\dim F = LMT^{-2}$	[дин] = [см · г · с ⁻²]	ньютон (Н), [Н] = [м · кг/с ²]
Давлення (пружне напруження)	T	$\dim T = L^{-1}MT^{-2}$	$\dim T = L^{-1}MT^{-2}$	бар = [дин/см ²] = [см ⁻¹ · г · с ⁻²]	[Н/м ²] = [м ⁻¹ · кг · с ⁻²] мільйєза (мпз = Па/м ²)
Електричний заряд (кількість електричності)	q	$\dim q = L^{3/2}M^{1/2}T^{-1}$	$\dim q = TI$	СГСЕ одиниця заряду, статКл, франклин (Фр), [q] = [см ^{3/2} · г ^{1/2} · с ⁻¹]	кулон (Кл). [q] = [Кл] = [А · с] = [Н · м ⁻¹ · с] = [кг · с ⁻¹]
Електричний потенціал	V	$\dim V = L^{1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$\dim V = L^2MT^{-3}I^{-1}$	СГСЕ одиниця потенціалу [V] = [см ^{1/2} · г ^{1/2} · с ⁻¹ · ε ₀ ^{-1/2}]; статВ	вольт (В), [В] = [м ² · кг · с ⁻³ · А ⁻¹] [В] = [Дж/Кл]
Напруженість електричного поля	E	$\dim E = L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	$\dim E = LMT^{-3}I^{-1}$	СГСЕ одиниця напруженості = [см ^{-1/2} · г ^{1/2} · с ⁻¹ · ε ₀ ^{-1/2}]. СГС = [E] = [см ^{-1/2} · г ^{1/2} · с ⁻¹] статВ/см = дин/статКл	вольт на метр (В/м) [E] = [В/м] = [Н/Кл] = [м · кг · с ⁻³ · А ⁻¹]
D – вільний заряд на одиницю поверхності, поверхнісна густина заряду, s – площа	D $D/E = \epsilon_0 \epsilon$	електрична індукція в СГС $\dim D = \dim q$ /dim $s = L^{-1/2}M^{1/2}T^{-1}$	електричне зміщення в СИ $\dim D = L^{-2}TI$	[D] = ед. СГС q/см ² СГС [D] = [см ^{-1/2} · г ^{1/2} · с ⁻¹] статКл/см ² , Фр/см ²	[D] = кулон на кв. метр = [Кл/м ²] = [А · с] · [м ⁻²] = [А] · [с] · [м ⁻²] = [Н · м ⁻¹] · [с] · [м ⁻²] = [м ⁻² · кг · с ⁻¹]
Сила електричного струму	I	$\dim I = L^{3/2}M^{1/2}T^{-2}$	$\dim I = I = MT^{-2}$	статА, [I] = [см ^{3/2} · кг ^{1/2} · с ⁻²]	ампер (А). [А] = [Н · м ⁻¹] = [кг · с ⁻²]
Механічна (пружна) деформація	S	нульова розмірність $\dim S = LL^{-1} = L^0 = 1$	Нульова розмірність $\dim S = LL^{-1} = L^0 = 1$	одиниця = [Δ см/см] = [см ⁰] = 1	одиниця [Δ м/м] = [м/м] = [м ⁰] = [1]

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
Смещение при упругой деформации	u	$\dim u = L$	$\dim u = L$	$[u] = [см]$	метр (м) $[u] = [м]$
Скорость	v	$\dim v = LT^{-1}$	$\dim v = LT^{-1}$	см/с, $[v] = [см \cdot с^{-1}]$	метр в секунду м/с, $[v] = [м \cdot с^{-1}]$
cD – компоненты тензора модулей упругости, измеренные при $D = const$	$cE = 1/sE$ $cD = 1/sD$	$\dim (cD) cE = L^{-1}MT^{-2}$	$\dim (cD) cE = L^{-1}MT^{-2}$	$[дин/см^2]$ $[cE]$ $= [см^{-1} \cdot г \cdot с^{-2}]$	ньютон на кв. метр (Па). $[Па] = [Н/м^2] = [м^{-1} \cdot кг \cdot с^{-2}]$
Постоянная упругости (коэффициент) $sE = (cE)^{-1}$; степень (-1) – означает транспонированную матрицу	$sE = 1/cE$ $sE = 1/YE$	$\dim (sD) sE = LM^{-1}T^2$	$\dim (sD) sE = LM^{-1}T^2$	$[см^2/дин]$ $[sE] = [(cE)^{-1}] = [(YE)^{-1}] = [см \cdot г^{-1} \cdot с^2]$	$[sE] = [м^2/Н] = [м \cdot кг^{-1} \cdot с^2]$
Модуль упругости (модуль Юнга)	YE	$\dim YE = L^{-1}MT^{-2}$	$\dim YE = L^{-1}MT^{-2}$	$[YE] = [см^{-1} \cdot г \cdot с^{-2}]$	$[YE] = [Н/м^2] = [Па] = [кг/м \cdot с^2]$
Абсолютная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, ϵ_r – диэлектрическая проницаемость ϵ_0 – электрическая постоянная $[\epsilon_0] = 1$	ϵT	нулевая размерность $\dim \epsilon T = 1$	$\dim \epsilon T = L^{-3}M^{-1}I^2T^4$	$[\epsilon T] = [см/см] = 1$	фарад/м (Ф/м). $[Ф/м] = [Кл/В] = [А^2 \cdot с^4 \cdot кг^{-1} \cdot м^{-3}]$
Диэлектрическая восприимчивость $\chi \epsilon = P/E$	χ	$\dim \chi = 1$	$\dim \chi = 1$	–	–
Пьезоэлектрическая постоянная $d = \epsilon T \cdot g = e \cdot sE$	d	$\dim d = L^1/2M^{-1}T^2$	$\dim d = L^{-1}M^{-1}T^3I$	СГС ед. заряда/дин. $[d] = [см^1/2 \cdot г^{-1/2} \cdot с]$	кулон/ньютон (Кл/Н). $[Кл/Н] = [кг^{-1} \cdot м^{-1} \cdot А \cdot с^3]$
Пьезоэлектрическая постоянная $e = d \cdot cE = \epsilon S \cdot h$	e	$\dim e = L^{-1/2} 1/2T^{-1}$	$\dim e = QM^{-2}$	СГСЕ д.заряда/см ² $[e] = [см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot с^{-1}]$	кулон/метр кв. = $[Кл/м^2]$
Пьезоэлектрическая постоянная $g = h \cdot sD = \beta T \cdot d$	g	$\dim g = L^1/2 M^{-1}T^2$	$\dim g = Q^{-1}M^2$	см/ед.заряда $[g] = [см^{1/2} \cdot г^{-1/2} \cdot с]$	кв. метр/кулон. $[м^2/Кл]$
Пьезоэлектрическая постоянная деформации h_t – компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов $h = \beta S \cdot e = g \cdot cD$	h	$\dim h = L^{-1/2}M^1/2T^{-1}$	$\dim h = LMT^{-3}I^{-1}$	дин/СГСЕ ед. заряда $[h] = [см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot с^{-1}]$	ньютон/кулон (Н/Кл). $[Н/Кл] = [м \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-1}]$

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
Компоненты тензора диэлектрической непроницаемости, при $S = \text{const}$	βS	$\dim \beta S = 1$	$\dim \beta S = L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	$[\beta S] =$ $[\text{см/см}] = 1$	$[\beta S] =$ $= [M^{-3} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot A^2]$

Постоянная распространения в каждом переходном слое $\gamma_2, \gamma_2 = \alpha_2 + j 2\pi / \lambda_2$. Активная излучающая поверхность преобразователя $-A_1, [A_1] = \text{м}^2; \alpha_n$ – коэффициент поглощения, λ_2 – длина волны ультразвука в каждом переходном слое $[\lambda_2] = [\text{м}]; l_2$ – толщина образца; z_2 – волновое сопротивление рабочего слоя – механический импеданс «механический Ом» (исследуемого образца), $z_2 = S \cdot \sqrt{Y\rho}$; S – поперечная площадь исследуемого образца; $\sqrt{Y\rho}$ – удельный

механический импеданс. Единица механического импеданса «механический Ом» $[z_2] = [\text{кг/с}]$.

Уравнение измерений в общем виде можно представить [2, 14]:

$$\begin{Bmatrix} E_g \\ I \end{Bmatrix} = \|S^{(3)}ij\| \times \begin{Bmatrix} F \\ v \end{Bmatrix},$$

где E_g – электродвижущая сила генератора, I – электрический ток.

Таблица 2. Электроакустическая аналогия физических величин [2] Шарапов В. М., [9] Ольсон Г., [7] Харкевич А. А.

	Механическая энергия	Электрическая энергия
Обобщенная сила [2]	Механическое напряжение (давление) $[T] = [\text{Н/м}^2]$	Напряженность электрического поля $[E] = [\text{В/м}]$ [8]
Обобщенное перемещение	Относительная деформация $[S] = [1]$	Электрическое смещение $[D] = [\text{Кл/м}^2]$
	$(I^1, I^2 \rightarrow U^1, U^2)$, Y – форма четырехполюсника (первый преобразователь-излучатель – первая пластина)	
	Образец (вторая пластина) $(F_1, v_1) \rightarrow (F_2, v_2)$ $(U^2, I^2) \rightarrow (U^2, I^2)$, B – форма четырехполюсника (образец – вторая пластина)	
	$(U^3, I^3 \rightarrow F^3, I^3)$, Z – форма четырехполюсника (второй преобразователь-приемник – третья пластина)	
Обобщенная сила [7]	механическая сила $[F] = [\text{Н}]$	электрическое напряжение $[V] = [\text{В}]$
Обобщенное перемещение	смещение (перемещение) $[u] = [\text{м}]$	заряд $q = [\text{Кл}]$
	$(I^1, I^2 \rightarrow U^1, U^2) \Rightarrow (I^2, U^2 \rightarrow U^2, I^2) \Rightarrow (U^3, I^3 \rightarrow I^3, I^3)$.	
Обобщенное перемещение [9]	линейное перемещение x	электрический заряд $q, [q] = [\text{Кл}]$
Обобщенная скорость	линейная скорость $v = x/\tau$ $[v] = [\text{ЛТ}^{-1}] = [\text{м/с}]$	Сила электрического тока I ампер (А). $[A] = [\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}]$
Обобщенная сила	сила	вольт e , вольт (В), $[V] = [\text{Дж/Кл}]$

Выводы

1. Таким образом, три четырехполюсника (преобразователь 1 – образец – преобразователь 2) расположены в следующем порядке, Y, Z, G – формы:

$$(I^1, I^2 \rightarrow U^1, U^2) \Rightarrow (I^2, U^2 \rightarrow U^2, I^2) \Rightarrow (U^3, I^3 \rightarrow I^3, I^3).$$

Особенностью изложенного подхода является необходимость стыковки выхода первого пьезокристалла с входом образца, представляющего из себя физическое тело без электрических вводов, и

далее, таким же образом – стыковка со вторым пьезокристаллом.

2. Установлено, что матрицу преобразователя-источника можно представить в виде

$$(S, D) = (T, E),$$

а матрицу преобразователя-приемника в виде

$$(T, E) = (S, D).$$

3. Матричное уравнение представляет собой уравнение измерений: (E_1, D_1) – вход четырехполюсника (первый пьезокристалл), (E_3, D_3) – выход четырехполюсника 2 пьезокристалл). Входная и выходная величины E_1 и E_3 измеряются в мВ. Ис-

комой величиною являється хвильове опротивлення робочого шару (исследуемого образца) z_2 .

4. В статті приведена схема проходження ультразвуку через досліджувану зразок за допомогою двох перетворювачів – джерела і приймача ультразвуку. Приведена схема розташування зразка і перетворювачів в моделі чотириполосників. Використання електроакустичних чотириполосників в практичній роботі дозволяє застосувати методику і теорію електричних ланцюгів. Приведені розмірності п'єзоелектричних постійних в системах СИ і СГС, невідповідності розмірності фізичних величин при різних підходах в визначенні фізичних величин по електроакустичній аналогії. Проаналізовано дотримання розмірності в рівнянні пружності для п'єзокристалла в залежності від значень фізичних величин в електроакустичній аналогії. Показано можливість смоделировать трьохшарову пластину в вигляді трьох послідовно з'єднаних електроакустичних чотириполосників.

5. Теоретично обґрунтована схема чотириполосника при проходженні ультразвуку через досліджувану зразок за допомогою двох перетворювачів – джерела і приймача ультразвуку.

6. Проаналізовано розмірність одиниць в рівняннях чотириполосників в системах СИ і СГС в формулюваннях по Шарипову В. М. і Харкевичу А. А. Приведені розмірності п'єзоелектричних постійних в системах СИ і СГС, невідповідності розмірності фізичних величин при різних підходах в визначенні фізичних величин в електротеплової аналогії.

Література

1. Неразрушаючий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустичні методи контролю: Практич. посібник Ермолов І. Н., Алешин Н. П., Потапов А. І. / Під ред. проф. Сухорукова. – М.: Вища школа, 1991. – 283 с.

2. Шарипов В. М. П'єзокристаллические датчики / В. М. Шарипов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарипова; під ред. Шарипова В. М. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
3. Мэзон У. П'єзоелектрические кристаллы и их применение в ультразвуковом акустике. – М.: Изд. иностр. литературы, 1952. – 448 с.
4. Ультразвуковые преобразователи; під ред. Кичури Е. – М.: Мир. – 1972. – 424 с.
5. Шульга Н. А. Колебания п'єзоелектрических тел / Н. А. Шульга, А. М. Болкисев. – Киев: Наук. думка. – 1990. – 227 с.
6. Магнитные и диелектрические приборы; під ред. Катца Г. В. Ч. 1. – М.: Энергия, 1964. – 416 с.
7. Харкевич А. А. Теория електроакустических преобразователей. Волновые процессы. Избранные труды в трех томах. Том 1. – М.: Наука, 1973. – 400 с.
8. Кэди У. П'єзоелектричество и его практическое применение. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1949. – 719 с.
9. Ольсон Г. Динамические аналогии. – М.: Гос. изд. иностр. литературы, 1947. – 224 с.
10. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. – 1980. – 280 с.
11. Фурдуев В. В. Электроакустика. – М-Л.: ОГИЗ. Гос. Изд-во техник-теор. лит-ры, 1948. – 515 с.
12. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний: Учебник. 3-е изд., испр. – СПб: Лань, 2005. – 440 с.
13. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
14. Домаркас В. И., Контрольно-измерительные п'єзоелектрические преобразователи / В. И. Домаркас, Р.-И. Ю. Кажис. – Вильнюс: Минтис, 1975. – 258 с.

УДК 534.21:534.8:681.2

О. І. Шевченко

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, м. Київ, Україна

МОДЕЛЬ ПРОХОДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКУ В ТРЬОХШАРОВІЙ ПЛАСТИНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНОЇ АНАЛОГІЇ

У статті приведена схема проходження і виміру ультразвуку крізь досліджувану зразок за допомогою двох перетворювачів – джерела і приймача ультразвуку. Приведена схема розташування зразка і перетворювачів в моделі чотириполосників. Використання електроакустичних чотириполосників в практичній роботі дозволяє застосувати методику і теорію електричних ланцюгів. Приведені розмірності п'єзоелектричних постійних в системах СИ і СГС, невідповідності розмірності фізичних величин при різних підходах у визначенні фізичних величин в електротеплової аналогії. Проаналізовано дотримання розмірності в рівнянні пружності для п'єзокристалла залежно від значень фізичних величин в електроакустичній аналогії. Наведено рівняння вимірювань.

Ключові слова: ультразвук, перетворювач, електроакустична аналогія, електричні чотириполосники, розмірність п'єзоелектричних параметрів, рівняння пружності для п'єзокристалів

O. I. Shevchenko*Main Astronomic Observatory of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine***MODEL OF ULTRASOUND'S PASSING IN THREE-LAYER PLATE WITH USED OF ELECTRO-ACOUSTIC ANALOGY**

In the article resulted chart of passing and measuring of ultrasound through the probed standard by means of two transformers – source and receiver ultrasound. A layout of standard and transformers chart is resulted in the model of quadripoles. The use of electro-acoustic quadripoles in practical work allows to apply methods and theory of electric chains. The dimensions of piezoelectric permanent in the systems SIS are resulted and CGC, disparities of dimension of physical sizes at different approaches in determination of physical sizes in an electro-thermal analogy. The observance of dimension is analyzed in equalizations of resiliency for piezocrystal depending on the values of physical sizes in an electro-acoustic analogy. Equalization of measuring is resulted.

Keywords: ultrasound, transformer, electro-acoustic analogy, electric quadripoles, dimension of piezoelectric permanent, equalizations of resiliency for piezocrystals.

*Надійшла до редакції
28 квітня 2017 року*

*Рецензовано
12 травня 2017 року*

© Шевченко А. И., 2017

УДК 621.396.6

МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФЕКТАЦИИ АППАРАТНЫХ СВЯЗЕЙ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

¹⁾Сакович Л. Н., ²⁾Рыжов Е. В.

¹⁾*Институт специальной связи и защиты информации Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Государственной службы специальной связи и защиты информации Украины,
г. Киев, Украина;*

²⁾*Национальная академия сухопутных войск имени гетмана Петра Сагайдачного,
г. Львов, Украина*

E-mail: lev@sakovich.com.ua, zheka1203@ukr.net

В статье предложена методика предварительной дефектации аппаратных связей с множественными повреждениями в полевых условиях для определения реального технического состояния объекта силами штатных экипажей. Она заключается в формировании комплексной оценки технического состояния аппаратных связей на основе использования установленных зависимостей вероятности и достоверности оценки от компоновки, устойчивости элементов и характера повреждения объекта. Разработана блок-схема алгоритма определения последовательности и количества проверяемых блоков в процессе предварительной дефектации, а также вычисления вероятности правильной оценки степени повреждения аппаратной связи. Показана реализация методики на примере аппаратной связи, а также приведены результаты расчетов по блок-схеме алгоритма. Полученные результаты позволяют значительно сократить время определения реального технического состояния поврежденной техники связи с заданной достоверностью результата для обоснования целесообразности и места проведения ремонта.

Ключевые слова: *множественные повреждения, аппаратные связи, оценка технического состояния, дефектация.*

Постановка задачи. Анализ исследований и публикаций

При получении радиоэлектронными средствами и аппаратными связями, которые относятся к

радиотехническим устройствам и системам, аварийных и боевых повреждений в полевых условиях их экипажам необходимо за минимальное время с заданной достоверностью оценить степень повреж-