

## О связанности электронных и механических процессов при приеме звука в пьезокерамической среде цилиндрического преобразователя в присутствии плоского экрана

А.В. Дереча<sup>1</sup>, А.Г. Лейко<sup>2</sup>, О.Н. Позднякова<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> *Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники Вооруженных Сил Украины, пр-т. Воздухофлотский, 28/69, 03049 Киев, Украина*

<sup>2</sup> *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Иоганна Сикорского», пр-т. Победы, 37, 03056 Киев, Украина*

(Получено 24.02.2017; в отредактированной форме – 05.04.2017; опубликовано online 30.06.2017)

Строгим методом связанных полей в многосвязных областях решена задача приема плоских звуковых волн цилиндрическим пьезокерамическим преобразователем в присутствии плоского акустически жесткого экрана. Полученные аналитические выражения использованы для расчета параметров акустических, механических и электрических полей, анализ результатов которых позволил установить ряд особенностей в связанности электронных и механических процессов в пьезокерамической среде цилиндрического преобразователя в присутствии плоского экрана.

**Ключевые слова:** Цилиндрический пьезокерамический преобразователь, Плоский экран, Поля электрические, Механические, Акустические.

DOI: [10.21272/jnep.9\(3\).03017](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03017)

PACS number: 43.38. + n

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], упругие среды с пьезокерамическим эффектом характеризуются взаимной связью между электронными и механическими процессами, протекающими в них. При этом первые описываются фундаментальными уравнениями электродинамики, вторые – фундаментальными уравнениями механики. Если из материала, соответствующего такой среде, изготовить пьезокерамический элемент и приложить к его электродированным поверхностям созданную электрическим генератором разность потенциалов, то электрическое поле внешнего источника смещает из положения равновесия в элементе ионы циркония, титана свинца и кислорода, т.е. ионы элементов базового состава практически всех современных составов пьезокерамики. Возникающее при этом напряженно-деформированное состояние пьезокерамического элемента в произвольной точке внутри его объема определяется вторым законом Ньютона в дифференциальной форме [2]. Электрическое состояние деформируемого пьезокерамического элемента описывается уравнениями Максвелла [2]. При этом электрическое поле в объеме деформируемого пьезокерамического элемента является алгебраической суммой электрического поля внешнего источника и внутреннего электрического поля, которое возникает из-за смещения ионов из положения равновесия. Совместное действие сил упругости и сил Кулона со стороны внутреннего электрического поля приводит к увеличению эффективной жесткости (модулей упругости) деформируемой пьезокерамики.

Связующим звеном между фундаментальными уравнениями, описывающими электронные и механические процессы в пьезокерамических телах, являются так называемые уравнения физического состояния пьезокерамики [2]. Первое из них по своему

содержанию является обобщенным законом Гука для упругой среды с пьезокерамическим эффектом. Второе уравнение физического состояния пьезокерамики имеет смысл закона электрической поляризации диэлектрика с пьезокерамическими свойствами.

В настоящее время тела различной геометрической формы, образованные из сред с пьезокерамическим эффектом, и системы таких тел нашли широкое применение в технической акустике [3] в качестве излучателей и приемников звука в мультимедийных электроакустических технологиях. Их особенностью является взаимная связь между механическими процессами в пьезокерамических телах и процессами распространения звуковых волн в упругих средах, окружающих эти тела. Последние характеризуются рядом особенностей, существенно влияющих на акустические нагрузки пьезокерамических тел, а, следовательно, и на механические процессы, протекающие в них. Естественно, что через эти механические процессы особенности акустического нагружения пьезокерамических тел существенно влияют и на электронные процессы в них. С другой стороны на взаимную связь, возникающую между перечисленными физическими процессами при излучении и приеме звука пьезокерамическими телами определенным образом оказывает влияние и характер организации их электрического нагружения. Именно имеющееся на практике многообразие особенностей электрического и акустического нагружений пьезокерамических излучателей и приемников звука и систем из них обуславливает необходимость при выполнении проектных работ с целью поиска рациональных технических решений в каждом конкретном случае изучать и количественно оценивать взаимные связи между электронными, механическими и акустическими процессами в них.

Исследованию электронных процессов, протекающих в круговых цилиндрических пьезокерамиче-

\*[olpzdnyakova@gmail.com](mailto:olpzdnyakova@gmail.com)

ских преобразователях при работе их в режиме излучения в составе систем различного вида, были посвящены работы [4 – 6].

Целью данной работы является изучение электронных и механических процессов, протекающих в цилиндрическом пьезокерамическом преобразователе в режиме приема в присутствии плоского акустического экрана, через количественные характеристики параметров его электрического, механического и акустического полей.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как уже отмечалось, пьезокерамические среды характеризуются взаимосвязанностью электронных и механических процессов, протекающих в них. В качестве количественных характеристик этой взаимосвязи могут выступать различные зависимости, в которых присутствуют с электрической стороны – параметры электрического поля, а с механической – параметры механического поля. Применительно к задаче приема звука системой, состоящей из преобразователя 1 и акустического экрана 2 (рис. 1), в качестве такой характеристики примем угловые зависимости электрического напряжения на выходе преобразователя и его колебательной скорости от угла прихода на систему плоских звуковых волн.

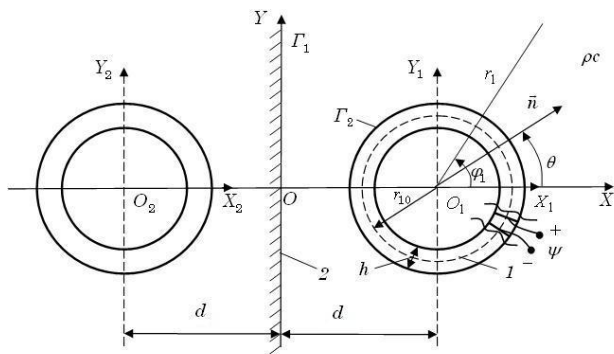


Рис. 1 – Нормальное сечение системы тел и введенные системы координат

Преобразователь 1 представляет собой круговую цилиндрическую пьезокерамическую оболочку с окружной поляризацией со средним радиусом  $r_0$  и толщиной  $h$ , внутренняя полость которой может быть вакуумирована, заполнена газом или жидкостью с плотностью  $\rho_1$  и скоростью звука  $s_1$ . Окружная поляризация создается путем жесткой склейки между собой  $N$  пьезокерамических призм, электрически включенных параллельно и нагруженных большим входным сопротивлением предварительного усилителя. Акустический экран 2 выполнен из акустически жесткого материала в виде локально реагирующей плоской поверхности больших волновых размеров. Плоскость экрана 2 параллельна продольной оси преобразователя 1 и находится на расстоянии  $d$  от нее. Экран и преобразователь расположены в упругой среде с плотностью  $\rho$  и скоростью звука  $s$ , в которой распространяются плоские звуковые волны, поверхность которых параллельна продольной оси преобразователя.

Для решения задачи введем (рис. 1) ряд координатных систем: общую  $OXYZ$  и локальную  $O_s X_s Y_s Z_s$ ,  $s = 1$ ; прямоугольные и связанную с локальной круговую цилиндрическую систему координат. Оси  $OZ$  и  $OY$  расположены в плоскости экрана, ось  $O_1 Z_1$  направим вдоль продольной оси преобразователя, а ось  $O_1 X_1$  – вдоль оси  $OX$ .

Кроме того, будем полагать, что экран и преобразователь имеют бесконечные протяженности, что справедливо в тех случаях, когда их длины существенно больше длин падающих на них звуковых волн.

Искомые зависимости между электронными и механическими процессами в пьезокерамической среде цилиндрического преобразователя в присутствии плоского экрана могут быть установлены путем совместного решения системы дифференциальных уравнений, состоящей из: уравнений вынужденной электростатики для пьезокерамики; уравнения Гельмгольца, описывающего движение упругих сред внутри и вне преобразователя системы; уравнений движения тонких оболочек с окружной поляризацией в перемещениях. Вид этих уравнений и необходимые расшифровки их составляющих приведены в работе [4].

Акустические граничные условия включают: условия Зоммерфельда; условие отсутствия особенностей во внутренней области преобразователя; условие на поверхности плоского экрана  $\Gamma_1$  в виде  $\partial \Phi_\Sigma / \partial x = 0$ , где  $\Phi_\Sigma$  – полное акустическое поле, создаваемое при падении плоских волн на рассматриваемую систему тел; кинематические условия сопряжения полей на криволинейных поверхностях  $\Gamma_2$  преобразователя имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= -\frac{d\Phi_{\text{вн}}}{dr_1}, \quad 0 \leq |\varphi_1| \leq \pi, \quad r_1' = r_{10} - \frac{h}{2} \\ \frac{dw}{dt} &= -\frac{d\Phi_\Sigma}{dr_1}, \quad 0 \leq |\varphi_1| \leq \pi, \quad r_1' = r_{10} + \frac{h}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega$  – нормальная составляющая вектора смещений точек срединной поверхности преобразователя; динамические условия сопряжения полей на криволинейной поверхности  $\Gamma_2$  преобразователя равны:

$$\sigma_r = q_r = -(p_\Sigma - p_{\text{вн}}), \quad 0 \leq |\varphi_1| \leq \pi, \quad (2)$$

где  $\sigma_r$  – нормальная составляющая тензора напряжений в пьезокерамике преобразователя;  $p_\Sigma = \rho \frac{\partial \Phi_\Sigma}{\partial t}$  и  $p_{\text{вн}} = \rho \frac{\partial \Phi_{\text{вн}}}{\partial t}$  – радиационные нагрузки на преобразователь от динамического давления внешнего  $\Phi_\Sigma$  и внутреннего  $\Phi_{\text{вн}}$  акустических полей.

Особенность акустических граничных условий состоит в том, что они одновременно заданы на поверхностях разной конфигурации – плоской  $\Gamma_1$  и криволинейной  $\Gamma_2$ .

Электрические условия заданы для режима холостого хода работы преобразователей, когда он нагружен на предварительный усилитель с большим входным сопротивлением и ток смещения в упругой

среде с пьезокерамическим эффектом стремится к нулю. Уравнения вынужденной электростатики для пьезокерамического преобразователя единичной высоты могут быть представлены [2] в виде:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial}{\partial t} \int_0^1 \int_0^{2\pi} D_{\varphi}^i r_1 d\varphi_1 dz = 0, \quad (3)$$

где  $2\pi N$  – угол, в который вписывается каждая призма этой секционированной оболочки;  $D_{\varphi}^{(i)}$  – окружная составляющая электрической индукции для  $i$ -й призмы [4].

### 3. ВЫВОД РАСЧЕТНЫХ СООТНОШЕНИЙ

Решение сформулированной задачи будем осуществлять с использованием метода изображений. Суть его состоит в том, что решение строится с учетом введения в рассмотрение воображаемой оболочки (рис. 1) таким образом, чтобы будучи наложенным на основное решение, оно позволяло удовлетворять определенным граничным условиям. Введем в рассмотрение вспомогательную систему координат ( $X_2, Y_2$ ), связанную с воображаемой оболочкой, и разместим ее так, чтобы полюса  $O_1$  и  $O_2$  были размещены симметрично относительно плоскости  $Y = 0$ . Полное дифрагированное поле представим в виде:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_O^{(1)} + \Phi_S^{(1)} + \Phi_O^{(2)} + \Phi_S^{(2)}, \quad (4)$$

где  $\Phi_O^{(1)}$  – приходящая на систему плоская волна единичной амплитуды;  $\Phi_S^{(1)}$  – плоская волна, которая отразилась бы от плоской границы  $\Gamma_1$  при отсутствии оболочки  $\Gamma_2$ ;  $\Phi_O^{(2)}$  – волна, рассеянная оболочкой  $\Gamma_2$ , при падении на нее приходящей плоской волны;  $\Phi_S^{(2)}$  – волна, рассеянная оболочкой  $\Gamma_2$  и отраженная от плоской границы  $\Gamma_1$ .

Выразим все поля в цилиндрических системах координат. Поле  $\Phi_{\Sigma}^{(1)}$ , представляющее собой суперпозицию приходящей  $\Phi_O^{(1)}$  и отраженной  $\Phi_S^{(1)}$  от плоской границы  $\Gamma_1$  плоских волн, можно представить в виде:

$$\Phi_{\Sigma}^{(1)} = \Phi_O^{(1)} + \Phi_S^{(1)} = \sum_n \alpha_n J_n(kr_1) e^{im\varphi_1} + \sum_n \beta_n J_n(kr_2) e^{im\varphi_2}, \quad (5)$$

где  $\alpha_n = i^n e^{-in\theta}$ ;  $J_n$  – функция Бесселя;  $k$  – волновое число;  $\theta$  – угол прихода на систему плоской волны.

Поле  $\Phi_{\Sigma}^{(2)}$ , являющееся суперпозицией рассеянной  $\Phi_O^{(2)}$  от границы  $\Gamma_2$  плоской волны и отраженной  $\Phi_S^{(2)}$  от плоской границы  $\Gamma_1$  этой рассеянной волны, выразим в виде разложений по цилиндрическим волновым функциям, удовлетворяющим условию излучения на бесконечности для временной зависимости  $e^{-i\omega t}$ :

$$\Phi_{\Sigma}^{(2)} = \Phi_O^{(2)} + \Phi_S^{(2)} = \sum_n A_n H_n^{(1)}(kr_1) e^{im\varphi_1} + \sum_n B_n H_n^{(1)}(kr_2) e^{im\varphi_2}. \quad (6)$$

где  $H_n^{(1)}$  – функция Ханкеля первого рода.

Поле  $\Phi_{\text{вн}}$  внутри пьезокерамической оболочки преобразователя выразим разложением в ряд по цилиндрическим волновым функциям, не имеющим особенностей внутри оболочки:

$$\Phi_{\text{вн}} = \sum_n C_n J_n(k_{\text{вн}} r_1) e^{im\varphi}. \quad (7)$$

где  $k_{\text{вн}}$  – волновое число среды внутри преобразователя.

Полное дифрагированное поле  $\Phi_{\Sigma}$  должно удовлетворять граничному условию на плоской границе  $\Gamma_1$ . Тогда, по аналогии с выводами работы [7], в случае жесткой плоской поверхности  $\Gamma_1$  связь между коэффициентами в выражениях (5) и (6) следует выбрать в виде:

$$\beta_n = (-1)^n \alpha_{-n}; \quad B_n = (-1)^n A_{-n}. \quad (8)$$

Представим искомые механические поля ( $u, w$ ) преобразователя в виде разложений

$$u = \sum_n u_n e^{in\varphi}; \quad w = \sum_n w_n e^{in\varphi}, \quad (9)$$

где  $u_n$  и  $w_n$  – неизвестные коэффициенты разложения.

Известно, что при механическом динамическом деформировании пьезокерамической цилиндрической оболочки с окружной поляризацией справедливы приближенные соотношения для составляющих электрической индукции вдоль радиуса  $D_r$ , продольной оси  $D_z$  и окружности  $D_{\varphi}$  и напряженности электрического поля в материале пьезокерамической оболочки преобразователя представленные в работах [4, 5].

Подставив в электрические условия (3) приведенные соотношения с учетом выражений (9) и выполнив ряд преобразований, получим выражение для окружной компоненты напряженности электрического поля преобразователя в составе рассматриваемой системы в виде

$$E_{\varphi} = - \frac{e_{33}}{r_{10} \epsilon_{33}^S} w_0, \quad (10)$$

где  $w_0$  – нулевая мода механических колебаний пьезокерамического преобразователя.

Для применения граничных условий (1) и (2), заданных на криволинейной границе  $\Gamma_2$ , необходимо все акустические поля представить в локальных координатах ( $r_1, \varphi_1, z_1$ ) преобразователя системы. Перенос систем координат осуществляется с помощью теорем сложения для волновых цилиндрических функций [5].

Алгебраизация системы дифференциальных уравнений, описывающих функционирование пьезокерамического преобразователя вблизи плоского экрана, с использованием соотношений (1), (2), (4) – (10) и теорем сложения на основании свойств полноты и ортогональности систем угловых функций на интервале  $[0, 2\pi]$  позволяет получить для определения неизвестных коэффициентов разложений  $u_n, w_n, u_n, A_n, C_n$  следующую бесконечную систему линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 & icw_n - A_n H_n^{(1)'}(kr_1') - \sum_m (-1)^m A_{-m} H_{m-n}^{(1)}(2kd) J_n'(kr_1') e^{i(m-n)\phi_{21}} = \\
 & = a_n J_n'(kr_1') + \sum_m (-1)^m a_{-m} J_{m-n}(2kd) J_n'(kr_1') e^{i(m-n)\phi_{21}}; \quad n = -\infty, 0, \infty; \\
 & icw_m - C_m J_m'(k_{\theta n} r_1^n) = 0, \quad m = -\infty, 0, \infty; \\
 & w_n R_n + \frac{e_{33} r_{10}}{C_{33}^E} E_\varphi - \frac{i\omega\alpha}{h} \rho_{\theta n} C_n J_n(k_{\theta n} r_1^n) + \frac{i\omega\alpha\rho}{h} A_n H_n^{(1)}(kr_1') + \\
 & + \frac{i\omega\alpha\rho}{h} \sum_m (-1)^m A_{-m} H_{m-n}^{(1)}(2kd) J_n(kr_1') e^{i(m-n)\phi_{21}} = \\
 & = -\frac{i\omega\alpha\rho}{h} a_n J_n(kr_1') - \frac{i\omega\alpha\rho}{h} \sum_m (-1)^m a_{-m} J_{m-n}(2kd) J_n(kr_1') e^{i(m-n)\phi_{21}}, \quad n = -\infty, 0, \infty.
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где

$$R_n = \frac{(n + n^3\beta)^2 - (1 + \beta n^4 - \omega^2\alpha\gamma) [(1 + \beta)n^2 - \omega^2\alpha\gamma]}{(1 + \beta)n^2 - \omega^2\alpha\gamma};$$

$$\beta = \frac{\hbar^2}{12r_{10}^2} \left[ 1 + \frac{e_{33}^2}{C_{33}^E \varepsilon_{33}^S} \right]; \quad \alpha = \frac{r_{10}^2}{C_{33}^E}; \quad C_{33}^E, \quad \varepsilon_{33}^S, \quad e_{33},$$

$\gamma$  – соответственно модуль упругости при нулевой электрической напряженности, диэлектрическая проницаемость при нулевой деформации, пьезоконстанта и плотность материала пьезокерамической оболочки преобразователя; ' – производная от функции.

Бесконечная система (11) является исходной для получения количественных данных о связанности электронных и механических процессов, протекающих в пьезокерамической среде цилиндрического преобразователя в присутствии жесткого плоского экрана.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Применим полученные соотношения для количественной оценки указанной выше связанности физических полей разной природы. В качестве характеристики этой связанности примем угловую зависимость разности потенциалов  $\psi$  на электрическом выходе пьезокерамического преобразователя в присутствии плоского экрана от угла  $\theta$  прихода плоских волн на рассматриваемую систему тел. С учетом приведенных выше соотношений имеем:

$$\psi(\theta) = \frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}} \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot w_0. \quad (12)$$

Расчеты выполнялись для следующих характеристик системы тел: пьезокерамика состава ЦТБС-3 с плотностью  $\gamma = 7210 \text{ кг/м}^3$ , пьезоконстантой  $e_{33} = 14,9 \text{ К/м}^2$ , диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{33}^S = 1280 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  и модулем упругости  $C_{33}^E = 13,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ; средний радиус оболочки  $r_{10} = 0,068 \text{ м}$  при толщине стенки  $h = 0,008 \text{ м}$  и количестве призм  $N = 48$ ; среда заполнения внутренней полости преобразователя – вакуум ( $\rho = 0$ ); внешняя среда – вода ( $\rho = 1,5 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^3$ ); расстояние между экраном и преобразователем изменялось от  $0,015 \text{ м}$  до  $0,12 \text{ м}$ ; частоты  $f$  плоских волн изменялись от

1000 Гц до 10000 Гц. Результаты расчетов представлены на рис. 2 – 4.

При анализе результатов исследований необходимо учесть следующее.

Во-первых, как следует из анализа кривых рис. 2, размещение вблизи кругового цилиндрического пьезокерамического преобразователя плоского жесткого экрана нарушает радиальную симметрию его акустического нагружения.

Во-вторых, в зависимости от угла прихода плоских звуковых волн на рассматриваемую систему тел, частоты волн и расстояния между экраном и преобразователем существенно изменяется величина и характер степени радиальной несимметричности этого акустического нагружения.

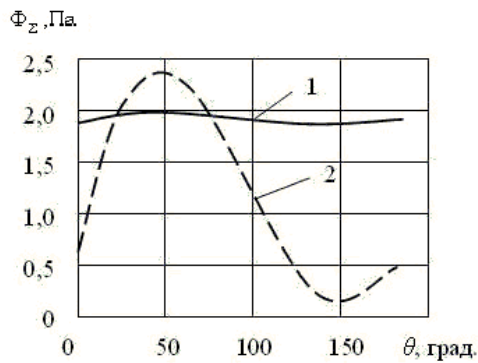
В-третьих, в механическом поле (рис. 3) кругового цилиндрического преобразователя, с нарушенной симметрией его акустической нагрузки, появляются последующие после нулевой моды колебания. Поскольку при этом энергия входящих плоских волн в механическом поле преобразователя распределяется между всеми модами его колебаний, а последующие моды могут быть сравнимы по амплитуде с нулевой, то амплитуда последней существенным образом зависит от величины нарушения радиальной симметрии акустической нагрузки преобразователя.

В-четвертых, при выбранном способе нанесения и включения электродов в секционированном преобразователе его электрическое нагружение является радиально симметричным. И только при таком способе электрического нагружения кругового цилиндрического пьезокерамического преобразователя в его электрическое поле «перекачивается» энергия только одной – нулевой моды колебаний его механического поля.

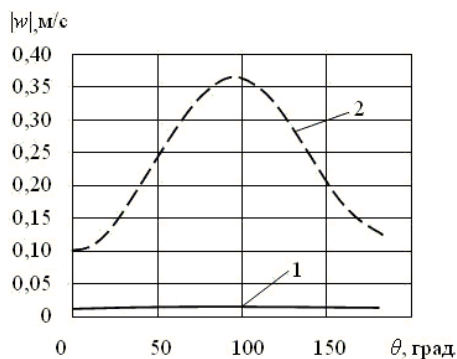
Другие моды колебаний не принимают в этом процессе никакого участия, поскольку взаимная связь между электронными и механическими процессами в упругой среде, обладающей пьезоэффектом и имеющей форму кругового цилиндра с радиальной симметрией электрического нагружения в соответствии с выражением (12) возможна только на нулевой моде механических колебаний этого цилиндра.

Анализ кривых, приведенных на рис. 4, подтверждает изложенное.

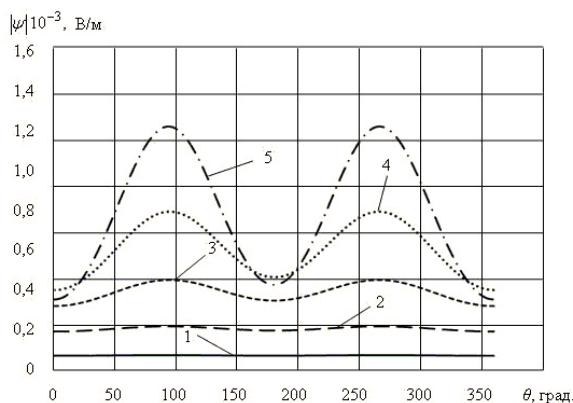
Действительно, как следует из сопоставления этих кривых, величина разности потенциалов  $\psi$  зависит от угла  $\theta$  прихода плоских волн, их частоты  $f$  и расстояния



**Рис. 2** – Зависимости акустического потенциала на поверхности преобразователя в точке  $r_{10} + h/2$ ,  $\varphi_1 = 90^\circ$  от угла  $\theta$  прихода плоских волн при  $d = 0,06$  м и  $f = 1000$  Гц (кр. 1);  $f = 5000$  Гц (кр. 2)



**Рис. 3** – Зависимости амплитуды радиальной колебательной скорости преобразователя в точке  $r_{10} + h/2$ ,  $\varphi_1 = 90^\circ$  от угла  $\theta$  прихода плоских волн при  $d = 0,06$  м и  $f = 1000$  Гц (кр. 1);  $f = 5000$  Гц (кр. 2)



**Рис. 4** – Угловые зависимости разности потенциалов на выходе преобразователя от частоты приходящих волн:  $f = 1000$  Гц (кр. 1);  $f = 2000$  Гц (кр. 2);  $f = 3000$  Гц (кр. 3);  $f = 4000$  Гц (кр. 4);  $f = 5000$  Гц (кр. 5) для расстояния до экрана  $d = 0,06$  м

$d$  между преобразователем и экраном. При малых волновых размерах  $d/\lambda$  наличие жесткого плоского экрана вблизи преобразователя практически не изменяет радиальную симметрию акустической нагрузки преобразователя (рис. 2, кр. 1). Поэтому радиальная колебательная скорость  $\omega$  (рис. 3, кр. 1) не зависит от угла  $\theta$  прихода плоских волн и полностью определяется колебательной скоростью нулевой моды колебаний преобразователя.

Следствием этого является такая же независимость разности потенциалов  $\psi$  (рис. 4, кр. 1) на выходе преобразователя от углов прихода плоских волн. Таким образом, в рассматриваемом случае наличие плоского экрана вблизи преобразователя не влияет на связанность электронных и механических процессов в пьезокерамической среде цилиндрического преобразователя. Они остаются такими же, как и в одиночном пьезокерамическом преобразователе.

Дальнейшее увеличение волнового расстояния  $d$  между экраном и преобразователем сопровождается появлением и возрастанием несимметричности акустической нагрузки преобразователя (рис. 2, кр. 2) и существенной зависимостью ее от направления прихода на систему плоских волн. Следствием этого является появление в механическом поле преобразователя его зависимости от угла  $\theta$  (рис. 3, кр. 2). Вид кривой 2 свидетельствует о том, что в колебаниях преобразователя кроме нулевой моды появились последующие моды и энергия приходящих плоских волн, в отличие от частоты  $f = 1000$  Гц, в этом случае распределяется между всеми возникшими модами колебаний.

Расчеты показывают, что для частоты  $f = 5000$  Гц такими модами являются нулевая, первая, вторая и третья. Соотношение между амплитудами колебательных скоростей этих мод в рассматриваемой точке  $r_0 + h/2$ ,  $\varphi_1 = 90^\circ$  равно  $\dot{w}_0 : \dot{w}_1 : \dot{w}_2 : \dot{w}_3 = 1,0 : 0,3 : 1,0 : 0,2$ , что свидетельствует об эффективном перераспределении энергии, «закачиваемой» в преобразователь рассматриваемой системы акустическим полем приходящих волн, между этими модами колебаний. В то же время, поскольку при выбранном способе нанесения электродов на пьезокерамические призмы преобразователя его электрическое поле остается радиально симметричным, в энергию электрического поля преобразователя перекачивается только энергия нулевой моды  $\omega$  механического поля (рис. 4, кр. 5).

Приведенные результаты свидетельствуют о следующем.

Во-первых, в высокочастотном приближении наличие плоского экрана вблизи преобразователя оказывает существенное влияние на связанность электронных и механических процессов в пьезокерамической среде преобразователя. Во-вторых, механические процессы в рассматриваемых случаях характеризуются большей сложностью, чем электронные. И, в-третьих, электронные процессы демонстрируют способность к избирательности взаимодействия с механическими процессами, характер которой определяется способом организации электрического поля в пьезокерамическом цилиндрическом преобразователе.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строгим методом связанных полей в многосвязных областях при решении задачи приема плоских звуковых волн пьезокерамическим цилиндрическим преобразователем с окружной поляризацией в присутствии плоского экрана получены аналитические соотношения, описывающие возникающие при этом и взаимодействующие между собой три физических поля – акустическое, механическое и электрическое. Их использование позволяет выполнять количествен-



ные оценки полей и на их основе провести анализ связанности электронных и механических процессов, протекающих в пьезокерамической среде преобразователя, в зависимости от многих геометрических и физических параметров и характеристик рассматриваемой системы – частоты и угла прихода плоских волн, материала и параметров пьезокерамической оболочки преобразователя и характера организации в

нем электрического поля, степени удаления экрана от преобразователя. Анализ приведенных в качестве примера количественных данных по результатам расчетов полей позволяет установить ряд интересных особенностей в связанности электронных и механических процессов в пьезокерамической среде преобразователя в присутствии плоского экрана.

## About Connectivity of Electronic and Mechanical Processes of Sound Receiving in the Piezoceramic Medium of Cylindrical Transducer in the Presence of a Flat Screen

A.V. Derepa<sup>1</sup>, A.G. Leiko<sup>2</sup>, O.N. Pozdniakova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, 28/69, Povitroflotskyi Ave., 03049 Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Peremohy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine

According to rigorous method of related fields in multi connected regions solved the problem of the reception of sound waves by flat cylindrical piezoceramic transducer in the presence of an acoustically hard flat screen. The analytical expressions used to calculate the parameters of acoustic, mechanical and electrical fields were obtained, analysis of which allowed establishing a number of features in connectivity of electronic and mechanical processes in the medium of the cylindrical piezoceramic transducer in the presence of a flat screen.

**Keywords:** Cylindrical piezoelectric transducer, Flat screen, Electric, Mechanical, Acoustic fields.

## Про пов'язаність електронних і механічних процесів при прийомі звуку в п'єзокерамічному середовищі циліндричного перетворювача в присутності плоского екрану

А.В. Дерепка<sup>1</sup>, О.Г. Лейко<sup>2</sup>, О.М. Позднякова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, пр-т. Повітрофлотський, 28/69, 03049 Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр-т. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна

Строгим методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях вирішена задача прийому плоских звукових хвиль циліндричним п'єзокерамічним перетворювачем в присутності плоского акустично жорсткого екрана. Отримані аналітичні вирази використані для розрахунку параметрів акустичних, механічних та електричних полів, аналіз результатів яких дозволив встановити ряд особливостей в пов'язаності електронних і механічних процесів в п'єзокерамічному середовищі циліндричного перетворювача в присутності плоского екрану.

**Ключові слова:** Циліндричний п'єзокерамічний перетворювач, Плоский екран, Поля електричні, Механічні, Акустичні.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.С. Дідковський, О.Г. Лейко, В.Г. Савін, *Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (Розрахунок, проектування, конструювання)* (Кіровоград: Імекс-ЛТД: 2006) (V.S. Didkovskiy, O.G. Leiko, V.H. Savin, *Elektroakustichni piezokeramichni peretvoriuvachi. (Rozrachunok, proektuvannya, konstruiuvannya)* (Kyiv: Imeks-LTD: 2006)).
2. О.Н. Петрищев, *Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Часть I. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса-антирезонанса* (Київ: Аверс: 2012) (O.N. Petrishchev, *Garmonicheskiye kolebaniya pyezokeramicheskikh elementov. Chast I. Garmonicheskiye kolebaniya pyezokeramicheskikh elementov v vakuume i metod rezonansa-antirezonansa* (Kyiv: Avers: 2012)).
3. В.С. Дідковський, С.М. Порошин, О.І. Дрозденко, *Конструювання електроакустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій* (Харків: ФПП Амелянчик: 2013) (V.S. Didkovskiy, S.M. Poroshyn, O.I. Drozdenko, *Konstruiuvannya elektroakustychnykh pryladiv i system dlia multymediiynykh akustychnykh tekhnologii* (Kharkiv: FPP Amelianchik: 2013)).
4. Z.T. Husak, A.G. Leyko, *J. Nano- Electron. Phys.* 8 No 1, 01029 (2016).
5. A.I. Nyzhnyk, A.G. Leiko, *J. Nano- Electron. Phys.* 8 No 4, 04012 (2016).
6. Y.I. Starovoit, A.G. Leiko, *J. Nano- Electron. Phys.* 8 No 4, 04018 (2016).
7. A.E. Babaev, V.G. Savin, A.A. Leiko, *JASA* 108 No 1, 157 (2000).