

УДК 534.3

## Электромеханические характеристики приемного цилиндрического электроупругого преобразователя размещенного в кольцевом слое

А.В. Коржик, д – р. техн. наук, В.П. Овсяник, д – р. техн. наук, Е.В. Попсуй, Н.Ю. Филиппова

Национальный Технический Университет «Киевский политехнический институт»,

ул. Политехническая, 16, корпус №12, г. Киев, 03056, Украина.

В работе рассмотрены угловые и амплитудно-частотные зависимости электромеханических характеристик приемного электроупругого преобразователя с полностью электродированной поверхностью, который размещен в замкнутом кольцевом слое. Рассчитаны и проанализированы распределения нормальных, радиальных и суммарных перемещений точек поверхности, импеданс системы и напряжение создаваемое на нагрузке электродов. Показаны закономерности влияния выбора материалов и размеров волнового слоя на величину и местоположение частоты резонанса системы. Выявлены и проанализированы особенности и отличия предложенного «сквозного» подхода в сравнении с традиционными методами.

**Ключевые слова:** прием звуковых волн, цилиндрическая оболочка, кольцевой слой, перемещение точек поверхности, угловые распределения, входной механический импеданс.

### Введение

На сегодняшний день задачи класса стационарной гидроэлектроупругости (позволяющие перейти от акустического давления непосредственно к электрическому напряжению на электрических нагрузках), применительно к вопросам приема акустических волн пьезокерамическими преобразователями, рассмотрены достаточно широко. Так, ранее были рассмотрены задачи приема и излучения акустических волн одиночными преобразователями [1,2] и антенными решетками различной конструкции [3,4] в постановках, не учитывающих их упругие характеристики и условия распределенности параметров самих преобразующих элементов. Отметим, что акустические характеристики цилиндрических пьезокерамических преобразователей с полностью электродированной поверхностью, работающих в кольцевом слое, в рамках электроупругих постановок изучены не достаточно.

Тем не менее, в работе [7] приведены результаты исследования особенностей формирования поля акустического давления вблизи преобразователя рассмотренного типа. Однако, полученные данные требуют дальнейшего анализа и уточнения, а именно - определения характеристик суммарных перемещений точек поверхности оболочки, импедансные характеристики, а также напряжения создаваемого на нагрузке.

При этом представляет практический интерес использование кольцевого слоя, который с одной стороны представляет собой устройство согласования преобразователя с рабочей средой, а с другой – является технологическим элементом.

Детальное изучение особенностей взаимодействия акустических, электрических и механических полей, очевидно, обеспечит рациональные приемы проектирования, как самих преобразователей, так и акустических устройств на их основе.

Таким образом, актуальность данной задачи обусловлена необходимостью углубленного изучения условий работы электроупругих преобразователей, работающих в кольцевом слое, в составе акустических устройств.

Целью работы является:

- определение влияния параметров кольцевых слоев на электромеханические и импедансные характеристики цилиндрических приемных преобразователей с полностью электродированной поверхностью;
- решение задачи определения электрического напряжения на выходе преобразователя, нагруженного на реальное электрическое сопротивление.

### Постановка задачи

Постановка задачи для данной приемной системы приводилась ранее в работе [7]. Отметим ее некоторые основные положения.

Считаем, что бесконечный по высоте цилиндр радиусом  $r_0$  работает в режиме приема в

жидкой среде с волновым сопротивлением  $\rho c$  через замкнутый кольцевой слой толщиной  $h_{0s}$ . Акустические свойства слоя характеризуются параметрами  $\rho_1, c_1$ . Колебательная система возбуждается внешним акустическим воздействием в виде плоской акустической волны единичной амплитуды, приходящей из бесконечности. При этом внутренняя полость преобразователя вакуумирована. Основное аналитическое решение задачи в части определения акустического поля приведено в работе [6].

### Условия проведения расчетов

Рассматривается приемный одиночный круговой цилиндрический преобразователь (пьезоматериал ЦТБС-3) с радиусом  $r_{0s} = 67 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и толщиной стенки  $h_{0s} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Преобразователь выполнен в виде радиально поляризованной оболочки со сплошными электродами, нагруженными на активное сопротивление  $Z_H = 1000 \text{ Ом}$ . Кольцевой слой выполнен из резины марки 51-1415, радиусом  $r_{1s} = 73 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  с параметрами  $c_1 = 1400 \text{ м}$ ,  $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$ . Оболочка находится в водной среде с плотностью  $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$  и скоростью звука  $c_2 = 1500 \text{ м/с}$ .

На указанную систему из бесконечности падает плоская звуковая волна единичной амплитуды под углом  $\alpha = 0^\circ$ . Рассмотрены случаи работы системы на частотах:  $f_1=4200 \text{ Гц}$ ,  $f_2=8200 \text{ Гц}$  ( $f_2$  - резонансная частота нулевой моды колебаний),  $f_3=11500 \text{ Гц}$ . Соотношение между акустическими параметрами слоя и окружающей среды характеризуем параметром  $m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$ .

### Анализ полученных результатов расчетов

Предполагается (исходя из результатов работы [7]), что внешнее воздействие в виде плоской волны определяет своеобразное угловое распределение возмущений со стороны среды  $R_\Sigma(\varphi_S)$ , которое обеспечивает соответствующее деформирование и распределение перемещений точек поверхности оболочки.

Угловые зависимости нормальных  $W_\Sigma(\varphi_S)$ , тангенциальных  $U_\Sigma(\varphi_S)$ , а также суммарных  $S_\Sigma(\varphi_S)$  перемещений точек оболочки определяются в виде:

$$S_\Sigma(\varphi_S) = W_\Sigma(\varphi_S) + U_\Sigma(\varphi_S), \quad (1)$$

где  $W_\Sigma(\varphi_S) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} W_n^s e^{in\varphi_S}$  - нормальная составляющая распределения перемещений точек поверхности оболочки;

$U_\Sigma(\varphi_S) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_n^s e^{in\varphi_S}$  - тангенциальная составляющая распределения перемещений точек поверхности оболочки;

$S_\Sigma(\varphi_S)$  - результирующее (суммарное) значение радиальной и тангенциальной составляющих;  $\varphi_S$  - окружная координата.

Результаты расчетов угловых распределений полных суммарных перемещений по поверхности оболочки-преобразователя (при  $\alpha = 0^\circ$ ,  $f_1=4200 \text{ Гц}$ ,  $f_2=8200 \text{ Гц}$ ,  $f_3=11500 \text{ Гц}$ )  $S_\Sigma(\varphi_S)$  приведены на рис.1.

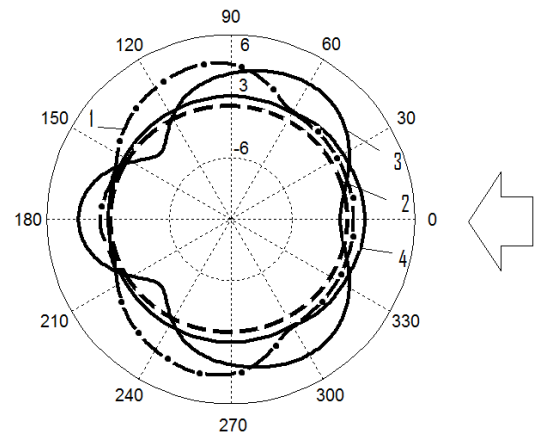


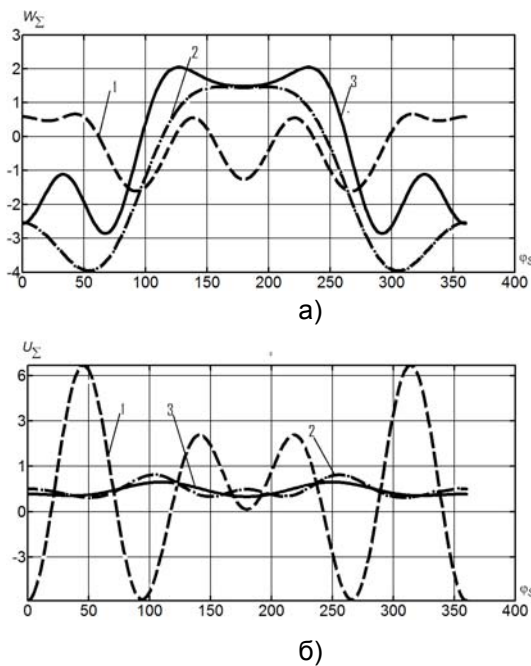
Рис. 1. Угловые распределения амплитуд суммарных перемещений точек поверхности оболочки при наличии кольцевого слоя,  $\alpha = 0^\circ$ : 1-  $f=4200 \text{ Гц}$ ; 2-  $f=8200 \text{ Гц}$ ; 3-  $f=11500 \text{ Гц}$ ; 4 - оболочка в состоянии покоя

Как видим (рис. 1) на частоте  $f_1=4200 \text{ Гц}$  (кривая 1) акустическое воздействие приводит к практически полному обжатию оболочки в секторе  $\varphi_S = 110^\circ \pm 30^\circ$  и  $\varphi_S = 250^\circ \pm 15^\circ$  с значением прогиба равным 5 дБ. Вся поверхность оболочки также деформируется: растяжению подвергаются участки с направлением  $\varphi_S = 180^\circ \pm 20^\circ$  с уровнем прогиба 3 дБ, смещения оболочки наблюдается в области  $\varphi_S = 0^\circ \pm 30^\circ$  по уровню 2 дБ.

На частоте  $f_2=8200 \text{ Гц}$  (кривая 2) (что соответствует резонансной частоте системы на нулевой моде) акустическое воздействие обуславливает сжатие оболочки в секторах

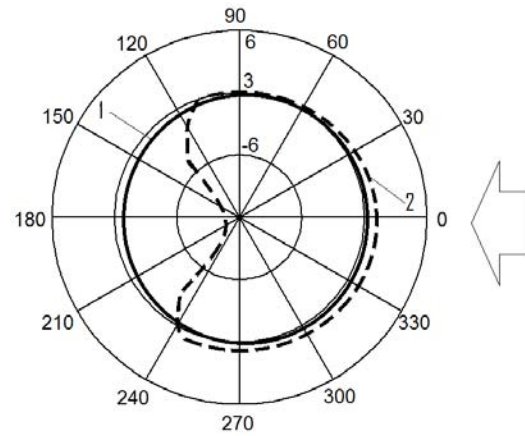
$\varphi_S = 90^0 \pm 5^0$  и  $\varphi_S = 270^0 \pm 5^0$ . Недеформируемой остается область  $\varphi_S = 0^0 \pm 15^0$   $\varphi_S = 180^0 \pm 10^0$ .

На частоте  $f_3=11500$  Гц (кривая 3) максимальный уровень прогиба оболочки наблюдается в области  $\varphi_S = 60^0 \pm 30^0$  и  $\varphi_S = 300^0 \pm 30^0$  и достигает 5 дБ. При этом прогиб оболочки в области  $\varphi_S = (120^0; 150^0)$  и  $\varphi_S = (210^0; 240^0)$  составляет -4 дБ. Недеформируемой остается область  $\varphi_S = (-15^0; 15^0)$ , т.е. величина прогиба в этом секторе соответствует ситуации статического обжатия и равна 0 дБ.



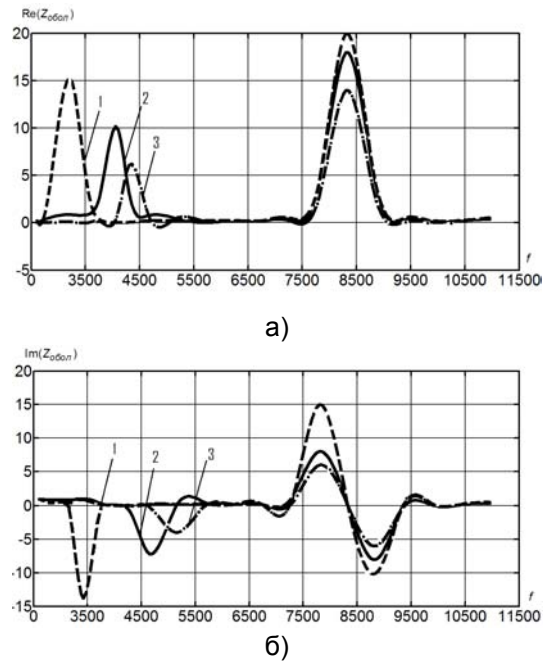
**Рис. 2.** Угловые распределения нормальной  $W_{\Sigma}(\varphi_S)$  (а) и тангенциальной  $U_{\Sigma}(\varphi_S)$  составляющих точек поверхности оболочки (б) в кольцевом слое с параметрами  $\rho_1 = 1500 \text{ кг/м}^3, c_1 = 200 \text{ м/с}, \alpha = 0^0$   $f=4200$  Гц; 2 -  $f=8200$  Гц; 3 -  $f=11500$  Гц

Далее сравним угловые распределения относительных амплитуд перемещений на поверхности оболочки без кольцевого слоя (полученные ранее в работе [5]) и со слоем (рис.3).



**Рис. 3.** Угловые распределения амплитуд суммарных перемещений точек поверхности оболочки без и при наличии кольцевого слоя,  $\alpha = 0^0$  1- преобразователь с кольцевым слоем; 2- преобразователь без слоя

Зависимости на рис 3. показывают, что наличие кольцевого слоя уменьшает амплитуду полных перемещений точек поверхности оболочки.



**Рис. 4.** Частотная характеристика активной  $\text{Re}(Z_{\text{обол}})(f)$  (а) и реактивной  $\text{Im}(Z_{\text{обол}})(f)$  (б) составляющих импеданса 1 -  $m=0,1$ ; 2 -  $m=0,2$ ; 3 -  $m=0,4$

Можно считать, что учет звукопрозрачности слоя (возникающей при определённом сочетании упругих, инерционных и волновых качеств оболочки) позволяет корректировать частотную характеристику на выходе преобразователя, выделяя ее определенные участки в соответствии с резонансными свойствами системы и характеристиками согласующего слоя.

Таким образом, наличие кольцевого слоя, фиксированных волновых размеров и определенного состава, в общем случае уменьшает величину деформации поверхности оболочки, что в свою очередь должно приводить к уменьшению напряжения на нагрузке электродов.

Исследование импедансных характеристик (рис.4) показало, что с увеличением значения

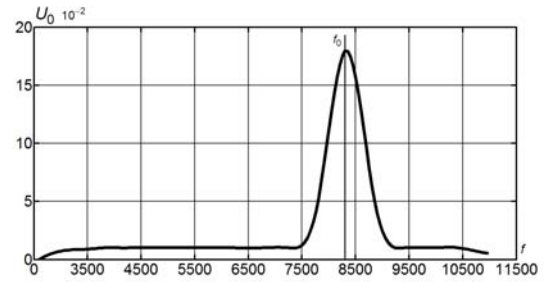
$$m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho c}, \text{ резонансная частота сдвигается в об-}$$

ласть частот  $f = [2600-3900]$  Гц, а амплитуда всплеска активной составляющей  $\text{Re}(Z_{\text{обол}})(f)$  падает на 10 дБ. Реактивная составляющая  $\text{Im}(Z_{\text{обол}})(f)$  имеет характер упругости в диапазоне частот  $[1500-3500]$  Гц.

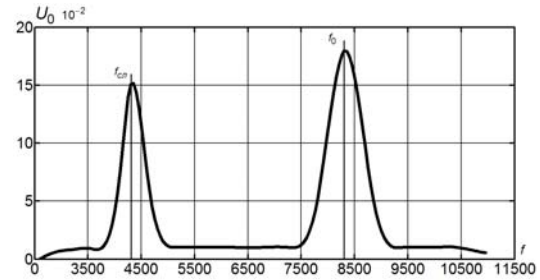
Таким образом, можно сделать вывод, что появление резонанса на низких частотах, вызвано взаимодействием упругости кольцевого слоя и присоединенной массой окружающей среды. В отличие от традиционных методов исследования данной задачи [1], наша модель, при тех же исходных данных, показала увеличение частоты резонанса кольцевого слоя почти в три раза.

Изменение характера движения поверхности преобразователя определяется эффектами связанности колебаний и непрерывным изменением характера механического импеданса преобразователя при переходе из нерезонансных областей в резонансные и наоборот, во всем рассмотренном диапазоне частот. Как показано в работе [7], осцилляции АЧХ звукового давления в соответствующих резонансных областях говорят о неоднократном изменении характера механического импеданса преобразователя с инерционного на упругий и на оборот. Этот факт хорошо подтверждается ходом частотной зависимости механического импеданса (рис.4.а, б).

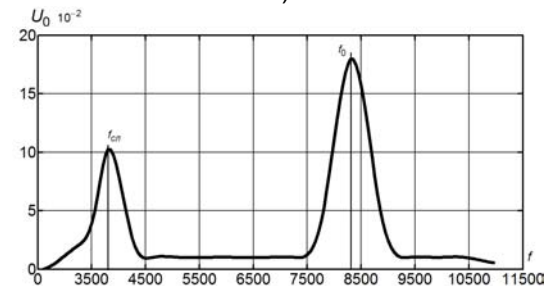
Далее сквозной подход позволяет перейти от акустического давления непосредственно к электрическому напряжению на электрических нагрузках.



а)



б)



в)

Рис. 5. Частотная зависимость напряжения  $U_0$ , создаваемого на нагрузке электродов, для различных параметров кольцевого слоя: а) оболочка без слоя; б)  $\rho_1 = 800 \text{ кг/м}^3, c_1 = 200 \text{ м/с}$ ; в)  $\rho_1 = 200 \text{ кг/м}^3, c_1 = 200 \text{ м/с}$

Таким образом, на электрической стороне преобразователя при использовании слоя в указанных расчётных условиях, на низких частотах также отмечается резонанс, который в зависимости от параметров слоя может быть по разному смещен относительно частоты резонанса  $f_0$ . В тоже время резонанс основной моды колебаний остается неизменным (8200 Гц).

То есть, несколько изменяя условия приема, определяемые сочетанием особенностей импедансных и волновых параметров системы, можно добиться перехода однорезонансной высокодобротной системы к относительно широкополосной.

## Выводы

По результатам решения сквозной задачи для режима приема звука цилиндрическим электроупругим пьезокерамическим преобразователем, размещенном в кольцевом слое, можно сделать следующие выводы:

- волновые условия, тип электродирования, наличие или отсутствие кольцевого слоя влияют на величину напряжения при нагрузке электродов;
- наличие кольцевого слоя позволяет расширить возможности преобразователя как широкополосной системы за счет наличия резонанса на низких частотах и совпадения этих резонансов с максимумами и минимумами коэффициента прохождения звука  $k_{пр}$ .

Таким образом, использование «сквозной задачи» дало возможность более точно определить значение частоты резонанса электроупругой системы «оболочка – слой – среда». Очевидно, полученный результат обусловлен учетом упругости преобразователя – оболочки.

## Литература

1. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций: В 5 т. –К.: Наукова думка, 1989. – Т.5: Электроупругость. –280с.
2. Гринченко В.Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках– Акад. Наук Украинской ССР, Институт гидромеханики. – К.: Наук.думка, 1986. – 240с
3. Коржик А.В. Исследование формирования характеристик направленности приемных плоских дискретных антенных решеток, состоящих из цилиндрических электроупругих преобразователей.- Тезисы докладов международной конференции «Динамические системы. Моделирование и стабильность». - 2001. - с.53.
4. Коржик А. В. Метод «сквозной» задачи и его приложение к определению напряжения на выходе антенной решетки при наклоне падения плоской волны.- Судостроит. Промышленность, сер. Акустика, 1991. – Вып.9. – с.27-29.
5. Коржик А.В. Применение метода “сквозной задачи” к исследованию амплитудно-частотных зависимостей характеристик акустического поля приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами .- Электроника и связь. – 2010. - №3. – с. 160–166.
6. Филиппова Н.Ю., Попсуй Е. В., Коржик А.В. Закономерности формирования акустических полей приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя, расположенного в кольцевом слое. - Электроника и связь. – 2012. - №6.
7. Филиппова Н.Ю., Коржик А.В. К вопросу дифракции звуковой волны на электроупругом цилиндре расположенного в замкнутом кольцевом слое. -Система обработки информации. – 2012. – Вып.№6. – с.45-50

УДК 534.3

## Електромеханічні характеристики циліндричного електропружного перетворювача в кільцевому шарі в режимі прийому

О.В.Коржик, д – р техн. наук, В.П. Овсяник, д – р. техн. наук, Є. В. Попсуй, Н.Ю. Філіпова  
 Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,  
 пр. Перемоги, 16, Київ, 03056, Україна.

В роботі розглянуті кутові і амплітудно-частотні залежності електромеханічних характеристик приймального електропружного перетворювача з повністю електродованною поверхнею, який розміщений в замкнутому кільцевому шарі. Розраховані і проаналізовані розподіл нормальних, радіальних і повних сумарних переміщень точок поверхні, імпеданс системи і напруга створювана на навантаженні електродів. Показані закономірності впливу вибору матеріалів і розмірів хвильового шару на величину і розташування частоти резонансу системи. Виявлено і проаналізовано особливості та відмінності запропонованого «наскрізного» підходу в порівнянні з традиційними методами.

**Ключові слова:** прийом звукових хвиль, циліндрична оболонка, кільцевої шар, переміщення точок поверхні, кутові розподілення, вхідний механічний імпеданс.

UDC 534.3

## Electromechanical characteristics electroelastic cylindrical receiving transducer, disposed in the annular layer

**A.V Korzhyk**, Dr.Sc., **V.P. Ovsyanik**, Dr.Sc., **E.V. Popsuy**, **N.Y. Filippova**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",  
pr. Peremogy, 16, Kyiv, 03056, Ukraine.

In this work the angle and amplitude-frequency characteristics of electromechanical characteristics of the receiving transducer with fully electroelasticity surface, which is placed in a closed circular layer. Calculated and analyzed the distribution of normal, radial and total cumulative displacement of surface points, the impedance of the voltage generated by the load of the electrodes. Showing of the influence of the choice of materials and the size of the wave layer on the size and location of the resonance frequency of the system. Identified and analyzed the features and differences of the proposed "through" approach in comparison with traditional methods.

**Keywords:** reception of sound waves, cylindrical shell ring layer, moving the surface points, the angular distributions, the input mechanical impedance.

### References

1. Grinchenko V.T., Ulitko A.F., Shulga N. A. (1989), [Mechanics of connected fields in structural elements]. K. Naukova Dumka, Vol.5: Electrodynamics. P.280. (Rus)
2. Grinchenko V. T., Vovk I.V. (1986), [Waves scattering of sound by elastic shells]. Acad. Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Fluid Mechanics. K.: Science. Dumka, P. 240. (Rus)
3. Korzhyk A.V. (2001), [Study of the formation of the directional characteristics of the receiving plane of discrete antenna array consisting of cylindrical electroelastic converter]. Proceeding of the International Conference "Dynamical Systems. Modeling and stability." P.53. (Rus)
4. Korzhyk A.V. (1991), [Method of "pass-through" of the problem and its application to the determination of the voltage at the antenna array at oblique incidence of a plane wave]. Shipbuilding. Industry, Ser. Acoustics. Issue 9. Pp.27-29. (Rus)
5. Korzhyk A.V. (2010), [The application of "cross-cutting challenges" to the study of amplitude-frequency dependence of the acoustic field receiving a cylindrical piezoelectric transducer with a split electrode]. Electronics and Communications. Issue № 3. Pp. 160-166. (Rus)
6. Filippova N.U., Popsuy E.V., Korzhyk A.V. (2012), [Regularities of the formation of acoustic fields receiving a cylindrical piezoelectric transducer disposed in the annular layer]. Electronics and Communication. No. 6. (Rus)
7. Filippova N.U., Korzhyk A.V. (2012), [On the diffraction of sound waves on Electroelastic cylinder located in a closed circular layer]. Information processing system. Issue. № 6. Pp.45-50. (Rus)

Поступила в редакцію 22 марта 2013 г.