

УДК 534.3

Исследование электромеханических характеристик излучающего цилиндрического пьезокерамического преобразователя с полностью электродированной поверхностью, расположенного в замкнутом кольцевом слое

А.В. Коржик, д-р техн. наук, Т.С. Куроедова, Н.Ю. Филиппова

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, г. Киев-56, 03056, Украина.

В работе определяется влияние параметров замкнутого упругого кольцевого слоя на электромеханические характеристики излучающего электроакустического цилиндрического электроупругого пьезокерамического радиально поляризованного преобразователя. Для решения задачи использовались метод частичных областей, метод Фурье, а также свойство полноты и ортогональности цилиндрических волновых функций.

Ключевые слова: преобразователь, кольцевой слой, коэффициент прохождения звука, импеданс излучения, «сквозная» постановка задачи.

Введение

В современной гидроакустике вопросы приема и излучения звуковых волн электроупругими круговыми цилиндрическими преобразователями рассмотрены достаточно широко. Тем не менее, особенности работы излучающих и приемных преобразователей в замкнутых и незамкнутых кольцевых слоях освещены лишь для традиционных моделей преобразователей без учета качеств и свойств систем с распределенными параметрами.

Это связано с недостаточной изученностью электроупругих постановок задач для приемно-излучающих систем. При этом представляют практический интерес особенности использования кольцевых слоев как элементов согласования электроупругих преобразователей с рабочей средой.

Таким образом, актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена необходимостью углубленного изучения условий работы электроупругого преобразователя, работающего в кольцевом слое, с использованием постановок класса задач стационарной гидроэлектродупругости.

Целью работы является определение влияния параметров кольцевых слоев на характери-

стики электроупругих круговых цилиндрических излучающих преобразователей с полностью электродированной поверхностью.

Постановка и решение задачи

Постановка и решение задачи приведены в работе [4].

Для исследования влияния упругого слоя на акустические свойства электроакустического цилиндрического электроупругого пьезокерамического радиально поляризованного преобразователя необходимо сравнить характеристики основных физических полей излучающих цилиндрических систем, определяемых в традиционной и предлагаемой постановках. Исследуются частотные зависимости коэффициента прохождения звука через цилиндрический слой $k_{пр}$ и безразмерного импеданса излучения преобразователя $Z_{изл}$.

Коэффициент прохождения звука представляет собой отношение следующего вида

$$k_{пр}(\omega) = \frac{|p_1(\omega)|}{|p_0(\omega)|}, \quad (1)$$

где $p_1(\omega)$ - давление на внешней поверхности слоя, $p_0(\omega)$ - давление, создаваемое цилиндром в отсутствии слоя на той же поверхности $r_s = R_{1s}$.

Давление на внешней поверхности слоя при работе преобразователя на нулевой моде определяется по формуле

$$p_1|_{r_s=R_{1s}} = -i\omega\rho_c [A_0 J_0(k_c R_{1s}) + B_0 N_0(k_c R_{1s})] = p_1(r), \quad (2)$$

в которой ρ_c - плотность материала слоя;

$k_c = \frac{\omega}{c_c}$ - волновое число слоя; c_c - скорость

звука в материале слоя; A_0, B_0 - коэффициенты звукового поля, которые определяются с по-

мощью соотношений, которые приведены в работах [1, 3, 4]

$$A_0 = \frac{\eta_{R_{0s}}^0(\omega)_{изл}}{1 - \frac{\beta_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}}{\xi_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}} \Delta_{R_{0s}}^0(\omega)_{изл}}. \quad (3)$$

$$B_0 = - \frac{\eta_{R_{0s}}^0(\omega)_{изл}}{1 - \frac{\beta_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}}{\xi_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}} \Delta_{R_{0s}}^0(\omega)_{изл}} \frac{\beta_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}}{\xi_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}}. \quad (4)$$

В выражениях (3), (4) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \beta_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл} &= \\ &= \rho c J'_0(k_c R_{1s}) H_0^{(1)}(k R_{1s}) - \\ &- \rho c c_c J_0(k_c R_{1s}) H_0^{(1)}(k R_{1s}); \\ \xi_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл} &= \\ &= \rho c N'_0(k_c R_{1s}) H_0^{(1)}(k R_{1s}) - \\ &- \rho c c_c N_0(k_c R_{1s}) H_0^{(1)}(k R_{1s}); \\ \eta_{R_{0s}}^0(\omega)_{изл} &= \\ &= \frac{c U_0 2\pi}{\left[\tilde{a}(\omega) J'_0(k_c R_{0s}) - \tilde{b}(\omega) J_0(k_c R_{0s}) \right]}; \\ \Delta_{R_{0s}}^0(\omega) &= \\ &= \frac{\left[\tilde{a}(\omega) N'_0(k_c R_{0s}) - \tilde{b}(\omega) N_0(k_c R_{0s}) \right]}{\left[\tilde{a}(\omega) J'_0(k_c R_{0s}) - \tilde{b}(\omega) J_0(k_c R_{0s}) \right]}, \end{aligned}$$

где ρ - плотность среды; c - скорость распространения звука в среде; U_0 - напряжение; $H_0^{(1)}(k R_{1s})$ - функция Ханкеля первого рода, нулевого порядка; $J_0(k_c R_{1s})$ и $N_0(k_c R_{1s})$ - функции Бесселя и Неймана первого рода; $\tilde{a}(\omega) = \bar{F}_0(\omega) \left(-i \frac{k_c}{\omega} \right)$; $\tilde{b}(\omega) = R_{0s} \frac{1}{C_{11}^E h_{0s}} (i \omega \rho c)$, где C_{11}^E - модуль упругости материала пьезокерамики.

Для определения давления, создаваемого цилиндром на поверхности $r_s = R_{1s}$ при отсутствии слоя, используем выражение (2), которое примет следующий вид:

$$\begin{aligned} p_0|_{r_s=R_{1s}} &= \\ &= -i \omega \rho [A_0 J_0(k R_{1s}) + B_0 N_0(k R_{1s})] \end{aligned} \quad (5)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$ - волновое число среды; c - скорость распространения звука в среде; A_0, B_0 - коэффициенты звукового поля, которые определя-

ются по результатам работы [4] с помощью соотношений (3), (4).

Безразмерный импеданс излучения определяется как отношение давления на поверхности преобразователя (слоя) к нормальной составляющей колебательной скорости, которая имеет вид:

$$Z_{изл}(\omega) = \frac{Z(\omega)}{\rho c} = \frac{p_1}{W_0^s}, \quad (6)$$

$$\text{где } W_0^s = -i \frac{\omega}{c_c} \left[\frac{\eta_{R_{0s}}^0(\omega)_{изл} \cdot J'_0(k_c R_{0s})}{1 - \frac{\beta_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}}{\xi_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}} \Delta_{R_{0s}}^0(\omega)_{изл}} - \frac{\eta_{R_{0s}}^0(\omega)_{изл} \cdot N'_0(k_c R_{0s}) \beta_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}}{1 - \frac{\beta_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}}{\xi_{R_{1s}}^{(0)}(\omega)_{изл}} \Delta_{R_{0s}}^0(\omega)_{изл}} \right],$$

$$W_0^s = -i \omega W_0^s.$$

Условия проведения расчетов

Расчеты производились в среде математического моделирования Matlab для преобразователя из пьезокерамики состава ЦТБС-3 со следующими параметрами: скорость распространения звука $c_k = 3500$ м/с; плотность $\rho_k = 7300$ кг/м³; относительная диэлектрическая проницаемость $\frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0} = 2300$; пьезоконстанта $e_{31} = -3,4$ К/Н; модуль упругости $C_{11}^E = 8,8 \cdot 10^{10}$ Па. Преобразователь совершает колебания в среде с параметрами: скорость распространения звука $c = 1500$ м/с; плотность $\rho = 1000$ кг/м³ [6].

В качестве материалов слоя выбраны резины 51-1415, С-572 и 9831 с параметрами: скорость распространения звука $c_c = 1400$ м/с; плотность $\rho_c = 700$ кг/м³; скорость распространения звука $c_c = 1575$ м/с; плотность $\rho_c = 1500$ кг/м³; скорость распространения звука $c_c = 1825$ м/с; плотность $\rho_c = 1180$ кг/м³ соответственно [3].

Радиус $R_{0s} = 67,5$ мм и диаметр оболочки 135 мм; расстояние от центра оболочки до внешней поверхности слоя $R_{1s} = 77,5$ мм.

Количество удерживаемых членов ряда соответственно с полным электродированием равно нулю, [1].

Численные результаты

На рис. 1, 2 представлены соответственно частотные зависимости давления, развиваемого преобразователем, и безразмерного импеданса (две его составляющие – активная и реактивная) при отсутствии слоя (поверхность $r_s = R_{1s}$).

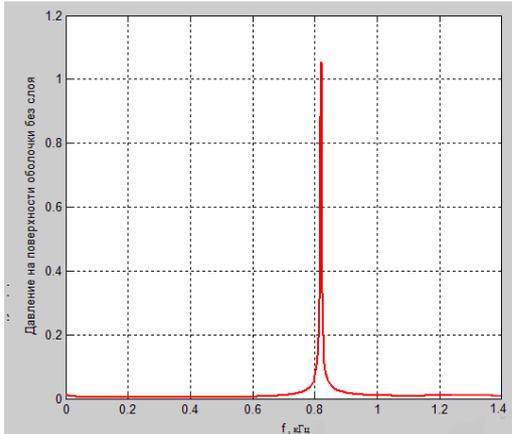


Рис. 1. Частотная зависимость давления $p_0(\omega)$ на поверхности преобразователя на расстоянии $r_s = R_{1s}$

В случае отсутствия упругого слоя преобразователь представляет собой однорезонанс-

ную систему, резонанс которой возникает на частоте 8,2 кГц, которая соответствует частоте резонанса нулевой моды оболочки из выбранной пьезокерамики и заданных размеров.

На рис. 2 показаны действительная $\frac{\text{Re}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ и мнимая $\frac{\text{Im}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ части безразмерного импеданса излучения цилиндрического преобразователя в зависимости от волнового радиуса цилиндра. Реактивная составляющая имеет характер массы.

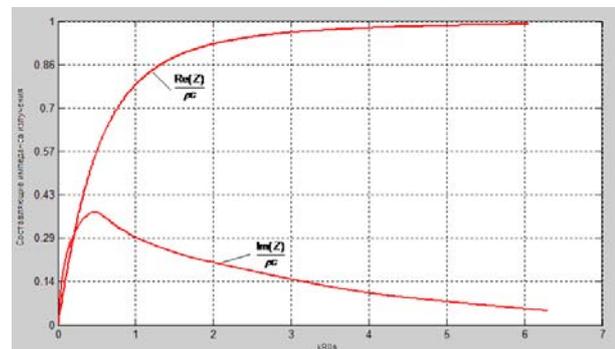


Рис. 2. Частотные зависимости активной $\frac{\text{Re}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ и реактивной $\frac{\text{Im}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ составляющих импеданса излучения преобразователя при отсутствии слоя

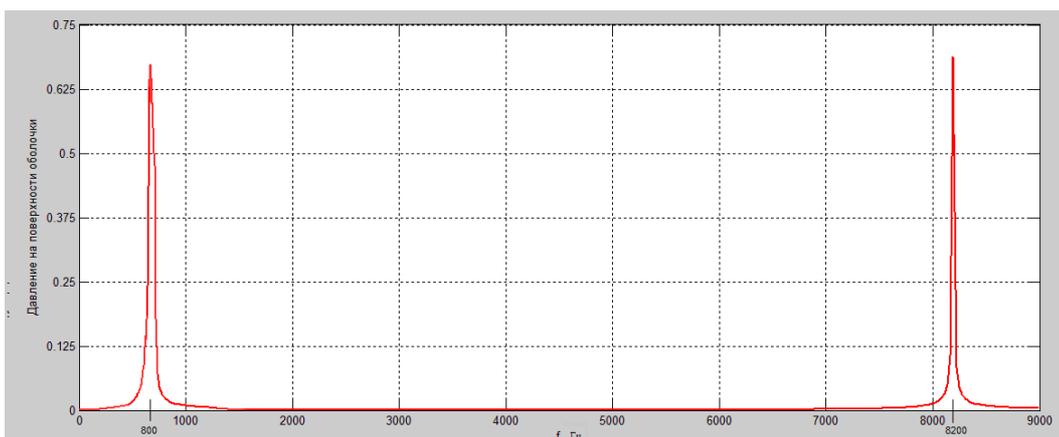


Рис. 3. Частотная зависимость давления $p_1(\omega)$ на поверхности слоя $r_s = R_{1s}$ (материал слоя – 51-1415)

На рис. 3 приведена частотная зависимость давления звукового поля $p_0(\omega)$, развиваемого преобразователем на расстоянии $r_s = R_{1s}$ (поверхность слоя). На рис. 4, 5 представлены зависимости составляющие

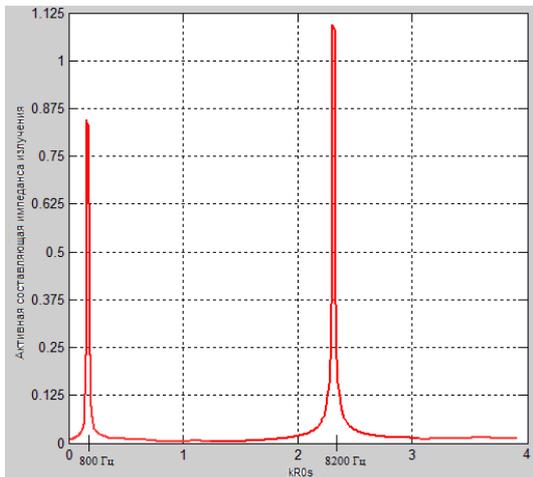


Рис. 4. Активная составляющая импеданса излучения $\frac{\text{Re}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ на поверхности слоя $r_s = R_{1s}$ (материал слоя – 51-1415)

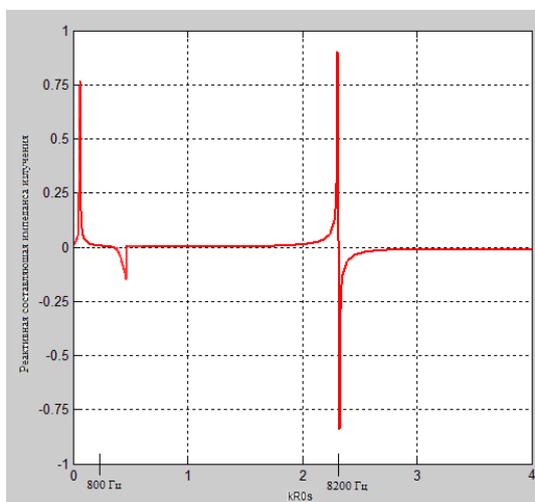


Рис. 5. Реактивная составляющая импеданса излучения $\frac{\text{Im}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ на поверхности слоя $r_s = R_{1s}$ (материал слоя – 51-1415)

импеданса излучения $\frac{Z(kR_{0s})}{\rho c}$, на рис. 6 – зависимость коэффициента прохождения звука $k_{\text{пр}}(kR_{0s}) = \left| \frac{p_1(kR_{0s})}{p_0(kR_{0s})} \right|$.

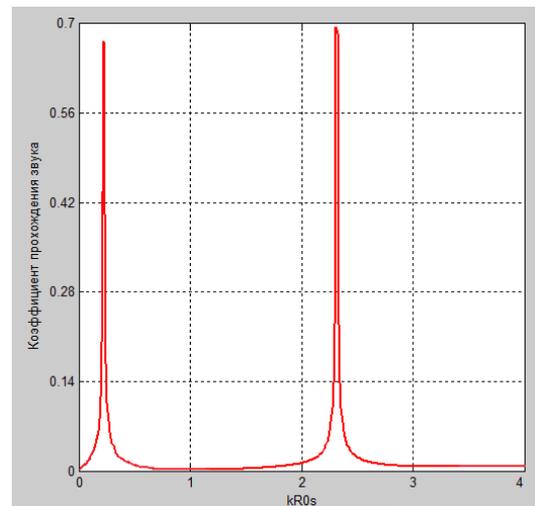


Рис. 6. Коэффициент прохождения звука $k_{\text{пр}}(kR_{0s}) = \left| \frac{p_1(kR_{0s})}{p_0(kR_{0s})} \right|$ (материал слоя – 51-1415)

Как видно из результатов расчета, приведенных на рис. 3 – 5, система является многорезонансной.

Таким образом, особенностями частотной зависимости, приведенной на рис. 4, 5, является возникновение резонанса в области НЧ при значении волнового параметра $kR_{0s} \approx 1$. Второй резонанс возникает при значении $kR_{0s} \approx 2,3$, что соответствует частоте 8,2 кГц.

Характер реактивной составляющей сопротивления излучения определяется волновой толщиной и материалом слоя, а также импедансом рабочей среды. Таким образом, резонанс на частоте 800 Гц обусловлен взаимодействием упругости цилиндрического слоя и присоединенной массы среды (воды), окружающей слой. Такая особенность отмечена ранее в работе [1]. На частотах, которые соответствуют всплеску активной составляющей сопротивления излучения, максимален и коэффициент прохождения $k_{\text{пр}}$.

Рассмотрим характер сопротивления излучения и коэффициента прохождения звука для двух других материалов слоя.

Пусть в качестве первого материала слоя выбрана резина С-572, а в качестве второго материала слоя выбрана резина 9831. На рис. 7 – 9 изображены зависимости составляющих импеданса излучения $\frac{\text{Re}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$,

$\frac{\text{Im}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ и коэффициента прохождения

звука $k_{\text{пр}}(kR_{0s}) = \frac{p_1(kR_{0s})}{p_0(kR_{0s})}$ для резины С-

572. На рис. 10 – 12 изображены зависимости составляющих импеданса $\frac{\text{Re}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$,

$\frac{\text{Im}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ излучения и коэффициента про-

хождения звука $k_{\text{пр}}(kR_{0s}) = \frac{p_1(kR_{0s})}{p_0(kR_{0s})}$ для резины 9831.

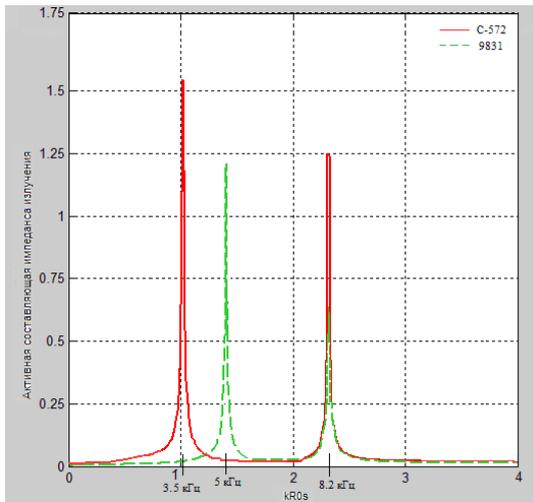


Рис. 7. Активная составляющая импеданса излучения $\frac{\text{Re}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ на поверхности слоя $r_s = R_{1s}$ (материал слоя – С-572, 9831)

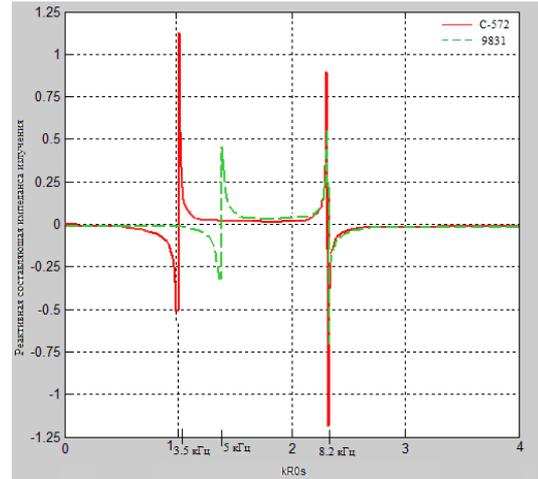


Рис. 8. Реактивная составляющая импеданса излучения $\frac{\text{Im}(Z(kR_{0s}))}{\rho c}$ на поверхности слоя $r_s = R_{1s}$ (материал слоя – С-572, 9831)

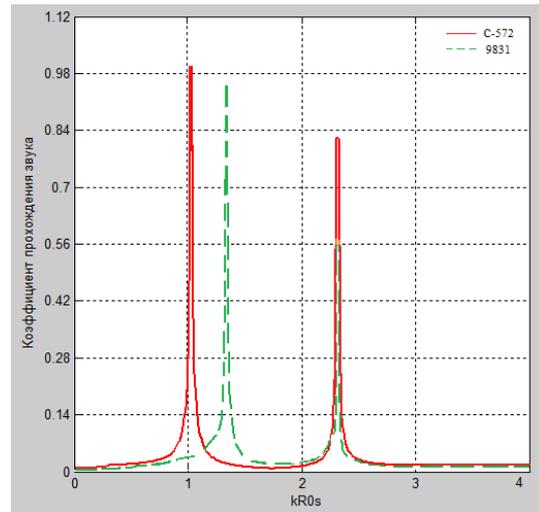


Рис. 9. Коэффициент прохождения звука $k_{\text{пр}}(kR_{0s}) = \frac{p_1(kR_{0s})}{p_0(kR_{0s})}$ (материал слоя – С-572, 9831)

Как видно из результатов расчета, приведенных на рис. 7, 8, система является двухрезонансной.

Особенностями частотной зависимости, приведенной на рис. 7, 8 является возникновение резонанса в области НЧ при значении волнового параметра $kR_{0s} \approx 1$ и $kR_{0s} \approx 1,5$. Второй резонанс возникает при значении $kR_{0s} \approx 2,3$, что соответствует частоте 8,2 кГц.

То есть можно сделать вывод, что с увеличением волнового сопротивления материала первый резонанс, вызванный взаимодействием упругости цилиндрического слоя и присоединенной массой среды, окружающей слой, сдвигается в область более высоких частот.

У коэффициента прохождения звука, представленного на рис. 9, первое максимальное значение достигается при значении волнового параметра $kR_{0s} > 1$, что соответствует частотам 3,5 кГц (параметры слоя: скорость распространения звука $c_c = 1575$ м/с; плотность $\rho_c = 1500$ кг/м³) и 5 кГц (параметры слоя: скорость распространения звука $c_c = 1825$ м/с; плотность $\rho_c = 1180$ кг/м³), а второй – при значении $kR_{0s} \approx 2,3$, что соответствует частоте 8,2 кГц.

Кроме того, с увеличением волнового сопротивления материала слоя амплитуда всплеска составляющих сопротивления излучения растет.

Давление, развиваемое на частоте дополнительного НЧ резонанса, больше, чем на частоте основного резонанса. Этот парадоксальный эффект отмечен ранее в работе [1].

Очевидно, можно подобрать материал слоя, который по своим упругим, инерционным и волновым характеристикам обеспечит совпадение максимальных значений коэффициента прохождения звука $k_{пр}(kR_{0s})$ с резонансом системы «оболочка-слой-среда» в области частот $\ll 8,2$ кГц.

Расчеты показывают, что этого можно добиться при следующих параметрах слоя: скорость распространения звука $c_c = 200$ м/с; плотность $\rho_c = 500$ кг/м³; толщина слоя $h_{0s} = 8 \cdot 10^{-3}$ м. Результат представлен на рис. 10.

Резонансные эффекты, приводящие к изменению звукопроницаемости слоя выражены больше, чем на рис. 6, 9, из-за большего

различия в волновых сопротивлениях $c_c \rho_c$ и c_p [2].

Волновое сопротивление среды: $c_p = 15 \cdot 10^5$; данного материала слоя: $c_c \rho_c = 10^5$, резин 51-1415: $c_c \rho_c = 9,8 \cdot 10^5$, С-572: $c_c \rho_c = 23,6 \cdot 10^5$, 9831: $c_c \rho_c = 21,5 \cdot 10^5$.

Кроме того, эффект, представленный на рис. 10, позволяет управлять работой преобразователя в широкой полосе частот.

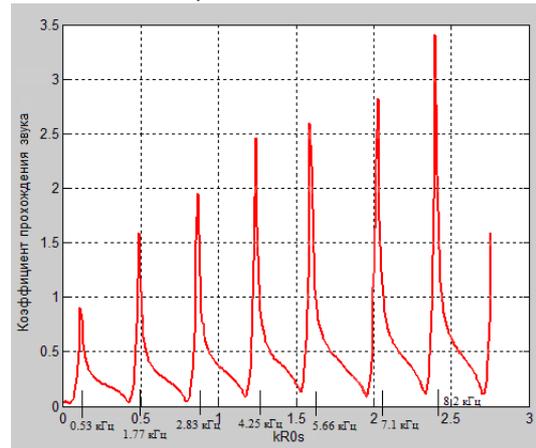


Рис. 10. Коэффициент прохождения звука

$$k_{пр}(kR_{0s}) = \frac{\rho_1(kR_{0s})}{\rho_0(kR_{0s})}$$

Выводы

В результате выполненной работы было определено влияние параметров кольцевого слоя на акустические характеристики цилиндрического электроупругого пьезокерамического радиально поляризованного преобразователя с полностью электродированной поверхностью в режиме излучения.

Можно сделать следующие выводы:

1. Наличие упругого слоя приводит к появлению дополнительного резонанса системы в области НЧ вследствие взаимодействия упругости цилиндрического слоя и присоединенной массы среды. Изменение упругих свойств слоя приводит к смещению резонанса, обусловленного взаимодействием слоя и присоединенной массой среды, в область более высоких частот.

2. Материал слоя, который по своим упругим инерционным и волновым характеристикам обеспечит совпадение частот, на которых достигаются максимальные значения коэффициента прохождения звука на поверхности

слоя и коэффициента прохождения звука в отсутствие слоя, имеет следующие параметры: скорость распространения звука $c_c = 200$ м/с; плотность $\rho_c = 500$ кг/м³; толщина слоя $h_{0s} = 8 \cdot 10^{-3}$ м.

3. Использование «сквозной» постановки задачи позволяет учесть дополнительную упругость оболочки, что приводит к уточненному определению частоты дополнительного резонанса системы в сравнении с результатами работы [2], где используется традиционная постановка задачи (то есть учитывается только упругость кольцевого слоя).

Литература

1. *Гринченко В.Т., Вовк И.В.* Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – Киев, Наук. думка, 1986. – 240 с.
2. *Гринченко В.Т.* Основы акустики. Учебное пособие / Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. – К.: Наук. думка, 2009. – 867 с.
3. *Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г.* Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання) // Навчальний посібник. – Кіровоград, «Імекс ЛТД», 2006. – 448 с.
4. *Коржик А.В., Филиппова Н.Ю.* Постановка и решение задачи о приеме звука цилиндрическим электроупругим преобразователем с полностью электродированной поверхностью, размещенном в замкнутом волновом слое // Электроника и связь. – 2012. – №1. – С.18 – 24.
5. *Плескач М.Г., Лейко О.Г.* Випромінення звуку циліндричним п'єзокерамічним перетворювачем, розміщеним в шарі звукопрозорого матеріалу // Електроніка і зв'язь. – 2010. – №4. – С. 175 – 179.
6. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. – 356с

УДК 534.3

Дослідження електромеханічних властивостей випромінюючого циліндричного п'єзокерамічного перетворювача з повністю електродованою поверхню, який розміщений у замкнутому кільцевому шарі

О.В. Коржик, д-р техн. наук, **Т.С. Куроєдова**, **Н.Ю. Філіпова**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги 37, м. Київ-56, 03056, Україна.

У роботі визначається вплив параметрів замкнутого пружного кільцевого шару на електромеханічні характеристики випромінюючого електроакустичного циліндричного електропружного п'єзокерамічного радіально поляризованого перетворювача. Для розв'язання задачі були використані метод часткових областей, метод Фур'є, а також властивості повноти та ортогональності циліндричних хвильових функцій.

Ключові слова: перетворювач, кільцевий шар, коефіцієнт проходження звуку, імпеданс випромінення, «наскрізна» постановка задачі.

UDC 534.3

The analysis of electromechanical characteristics of radiating cylindrical piezoceramic transducer with surface coated by solid electrodes located in the closed ring layer

A.V. Korzhyk, Dr.Sc., **T.S. Kuroiedova**, **N.Y. Philippova**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
37 Prospect Peremogy, Kyiv, 03056, Ukraine.

In this article is estimated the influence of closed ring layer parameters on the electromechanical characteristics of radiating electroacoustical cylindrical piezoceramic radially polarized transducer. To solve the problem there are used method of partial regions, the Fourier method and the property of completeness and orthogonality of cylindrical wave functions.

Keywords: *transducer, ring layer, coefficient of sound transmission, radiation impedance, "through" problem definition.*

References

1. *Grinchenko V.T., Vovk I.V. (1986), [Wave issues of sound dispersion on the elastic shells]. K.: Nauk. dumka, P. 240.*
2. *Grinchenko V.T. (2009), [Acoustics fundamentals]. K.: Nauk. dumka, P. 867.*
3. *Didkovskiy V.S., Leyko O.G., Savin V.G. (2006). [Electroacoustical piezoceramic transducers]. K.: «Imeks LTD». P. 448.*
4. *Korzhyk A.V., Philippova N.Y. (2012), [The definition and solution of the problem of sound receiving by cylindrical electroelastic transducer with surface coated by solid electrodes located in the closed ring layer]. Electronics and Communications, no.1. pp.18 – 24.*
5. *Pleskach M.G., Leyko O.G. (2010). [The sound radiation by cylindrical piezoceramic transducer located in the layer of sound transparent medium]. Electronics and Communications. No 4. pp. 175 – 179.*
6. *Pugachyov S.I. (1984), [Piezoceramic transducers]. L.: Sudostroyeniye, P. 356.*

Поступила в редакцию 10 января 2013 г.