

## О КОЭФФИЦИЕНТЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ СЛОЙ

А. Г. ЛЕЙКО, М. Г. ПЛЕСКАЧ

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр. Победы 37, г. Киев, тел. 454 90 72*

The subject of studies is an acoustic field of a cylindrical piezoceramic transducer in the presence of an impedance matching layer. This research is purposed to determine the influence such a layer has on the transducer's sound emitting ability, taking into account the transducer's finite mechanical impedance. A number of analytic expressions are obtained, determining the sound field's properties depending on the transducer's wavelength size. A computer modelling allowed making a few conclusions about the layer's influence on the sound pressure magnitudes. The results can be utilized in transducer development, helping to calculate the operational characteristics of similar type devices.

### ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается задача об излучении звука круговым цилиндрическим пьезокерамическим преобразователем, расположенном в замкнутом цилиндрическом слое конечных толщины и звукопрозрачности. Такая задача имеет несомненный практический интерес – в последнее время в конструкциях акустических приборов, используемых, например, в медицине, широко применяются переходные слои с физическими параметрами, величины которых лежат между соответствующими значениями параметров активного материала и рабочей среды. Заметим, что ранее подобная задача рассматривалась в ряде работ, например, [1]. При этом полагалась заданной колебательная скорость на излучающей поверхности акустического прибора. Такой преобразователь, по сути, рассматривался как генератор колебательной скорости с бесконечно большим внутренним импедансом, поскольку его колебательная скорость не зависела от реакции рабочей среды на возбуждение в ней звукового поля. Естественно, что такая модель является идеализированной и существенно отличается от реальной ситуации, когда внутренний импеданс излучателя является величиной конечной.

### ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Учет имеющих место при излучении звуковых волн электромеханического и механоакустического преобразования энергии предполагает использование таких методов расчета, в основе которых лежит решение уравнений движения колебательной системы преобразователя с учетом и пьезоэффекта, и реакции рабочей среды на движение такой системы. Подобный подход позволяет учесть взаимное влияние электрических, механических и акустических полей, действующих в преобразователе. При выполнении инженерных расчетов наиболее целесообразным является применение одной из разновидностей такого подхода – метода энергетических эквивалентов, позволяющего относительно просто оценить эффективность электромеханического преобразования энергии с помощью эквивалентной электромеханической схемы преобразователя.

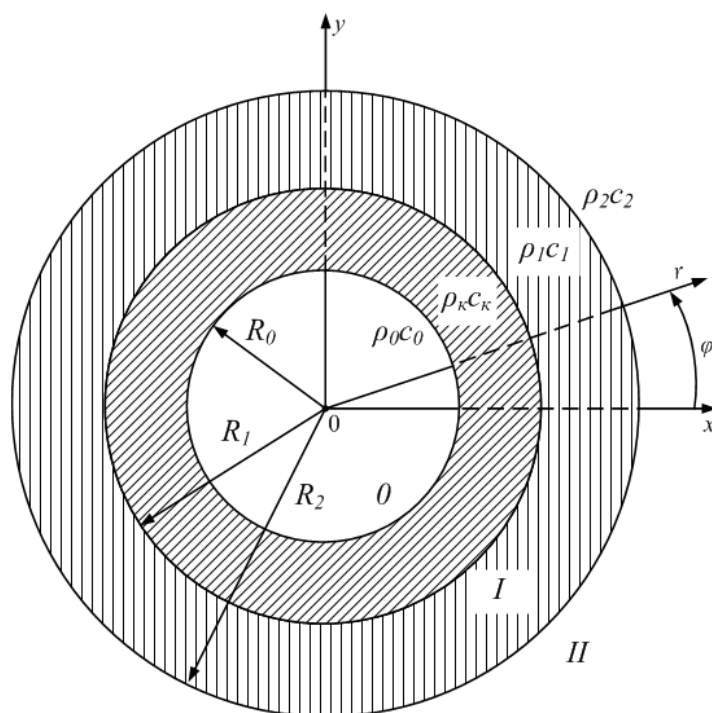


Рис. 1

Задачу излучения звука круговым цилиндрическим пьезоэлектрическим преобразователем через цилиндрический слой конечных толщины и звукопрозрачности решим указанным методом. На рис. 1 изображены нормальное сечение рассматриваемого преобразователя в слое и выбранная для решения система координат в предположении бесконечной длины преобразователя и слоя (что справедливо, если она превышает  $7 \div 10$  длин волн на рабочей частоте). Преобразователь имеет вид полого радиально поляризованного пьезокерамического цилиндра среднего радиуса  $R_{cp} = (R_1 - R_0)/2$  толщиной  $h_0 = R_1 - R_0$ . Сплошные электроды покрывают его внешнюю и внутреннюю поверхности. Под действием гармонического напряжения  $u = Ue^{-i\omega t}$  преобразователь излучает звук на нулевой моде колебаний в рабочую среду с волновым сопротивлением  $\rho_2 c_2$  через переходной слой с волновым сопротивлением  $\rho_1 c_1$ . Внутренний объем цилиндра заполнен средой с параметрами  $\rho_0 c_0$ . Будем считать, что толщина цилиндра  $h_0$  намного меньше его радиуса  $R_{cp}$  - для такого преобразователя справедлива прикладная теория, основанная на гипотезах Кирхгофа-Лява о напряженно-деформированном состоянии тонких пластин и оболочек.

Согласно методу частичных областей всю область существования звукового поля преобразователя разобьем на 3 частичные области: область 0, которая соответствует внутреннему объему цилиндра, область I, соответствующую переходному слою, и область II, охватывающую рабочую среду.

Потенциалы звукового поля в указанных областях – соответственно  $\Phi_0$ ,  $\Phi_1$  и  $\Phi_1$  – запишем в виде разложений по цилиндрическим волновым функциям:

$$\begin{aligned}\Phi_0(r, \varphi) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} L_m J_m(k_0 r) e^{im\varphi}, \\ \Phi_1(r, \varphi) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} [E_m J_m(k_1 r) + F_m N_m(k_1 r)] e^{im\varphi}, \\ \Phi_2(r, \varphi) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m H_m^{(1)}(k_2 r) e^{im\varphi}.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь  $L_m$ ,  $E_m$ ,  $F_m$  и  $A_m$  - неизвестные коэффициенты разложений;  $J_m(k_0 r)$ ,  $N_m(k_1 r)$ ,  $H_m^{(1)}(k_2 r)$  - соответственно функции Бесселя, Неймана и Ханкеля первого рода;  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  - волновые числа соответствующих областей.

Для того, чтобы найти неизвестные коэффициенты, воспользуемся условием связанности электрических, механических и акустических полей преобразователя в виде:

$$p_1|_{r=R_1} - p_0|_{r=R_0} + v Z_{ecv} = nU,\tag{2}$$

а также условиями сопряжения звуковых полей на границах раздела областей:

$$\begin{aligned}v_1|_{r=R_1} &= v_0|_{r=R_0} = v, \\ v_1(r)|_{r=R_2} &= v_2(r)|_{r=R_2}, \\ p_1(r)|_{r=R_2} &= p_2(r)|_{r=R_2}.\end{aligned}\tag{3}$$

В выражениях (2)-(3)  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  и  $v_0$ ,  $v_1$ ,  $v_2$  - соответственно звуковые давления и колебательные скорости в областях 0, I и II;  $v$  - колебательная скорость поверхности преобразователя;  $Z_{ecv}$  - механический импеданс преобразователя-цилиндрической оболочки на единицу его высоты;  $n$  - коэффициент электромеханической трансформации;  $U$  - электрическое напряжение возбуждения преобразователя.

Произведя алгебраизацию выражений (2)-(3) с учетом соотношений (1), получим искомые выражения, которые описывают формируемое пульсирующим излучателем звуковое поле во всех областях его существования.

Определим коэффициент прохождения звука через переходной слой [1] как:

$$k_{np} = |p_2 / \tilde{p}_2|_{r=R_2},$$

где  $p_2$  - давление на внешней поверхности переходного слоя  $r = R_2$ ,  $\tilde{p}_2$  - давление, создаваемое преобразователем на этой поверхности в отсутствие переходного слоя. С учетом произведенных преобразований выражение для  $k_{np}$  примет вид:

$$k_{np} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \cdot \left| \frac{\tilde{Z}_m \cdot B_0 J_0(k_1 R_2) + N_0(k_1 R_2)}{Z_m \cdot B_0 J_1(k_1 R_1) + N_1(k_1 R_1)} \cdot \frac{H_1^{(1)}(k_2 R_1)}{H_0^{(1)}(k_2 R_2)} \right|.\tag{4}$$

Здесь  $Z_m$  и  $\tilde{Z}_m$  - полные механические импедансы, соответственно, преобразователя с переходным слоем и преобразователя без него.

## ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 2 приведены результаты расчетов частотных зависимостей коэффициента прохождения звука через цилиндрический слой для разных значений  $n = \rho_1 c_1 / \rho_2 c_2$  - отношения волновых сопротивлений материала переходного слоя и окружающей среды. Здесь кривые 1-3 соответствуют значениям  $n=0.15$ ; 0.8; 5, а кривые 1'-3' соответствуют

случаю, когда  $k_{np}$  рассчитывался без учета электромеханического преобразования энергии – т.е. для описанного ранее преобразователя-генератора колебательной скорости с бесконечным внутренним импедансом. Заметим, что с целью облегчения последующего анализа внутренний объем цилиндра полагался заполненным вакуумом  $\rho_0 c_0 = 0$ . Рабочая среда – вода с параметрами  $\rho_2 c_2 = 1.5 \cdot 10^5$  кг·с/м<sup>2</sup>. Расчеты производились для преобразователя в слое радиусами  $R_0 = 64 \cdot 10^{-3}$  м и  $R_1 = 72 \cdot 10^{-3}$  м, выполненного из пьезокерамики с параметрами  $c_k = 3500$  м/с,  $\rho_k = 7250$  кг/м<sup>3</sup>,  $S_{11}^E = 10.7 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/Н,  $d_{31} = -134 \cdot 10^{-12}$  к/м,  $Q_m = 200$ . Волновая толщина переходного слоя при этом оставалась неизменной.

Как видно из приведенных результатов, учет в расчетной модели излучателя с переходным слоем внутреннего импеданса пьезокерамической оболочки приводит к существенным отличиям коэффициента прохождения звука через слой по сравнению с моделью, где такой импеданс считался бесконечным. Основные резонансы  $k_{np}$  теперь находятся в области частот, определяемых резонансом колебательной системы «преобразователь-переходной слой». Частота этих резонансов с увеличением отношения  $n$  уменьшается в связи с увеличением эквивалентой массы переходного слоя.

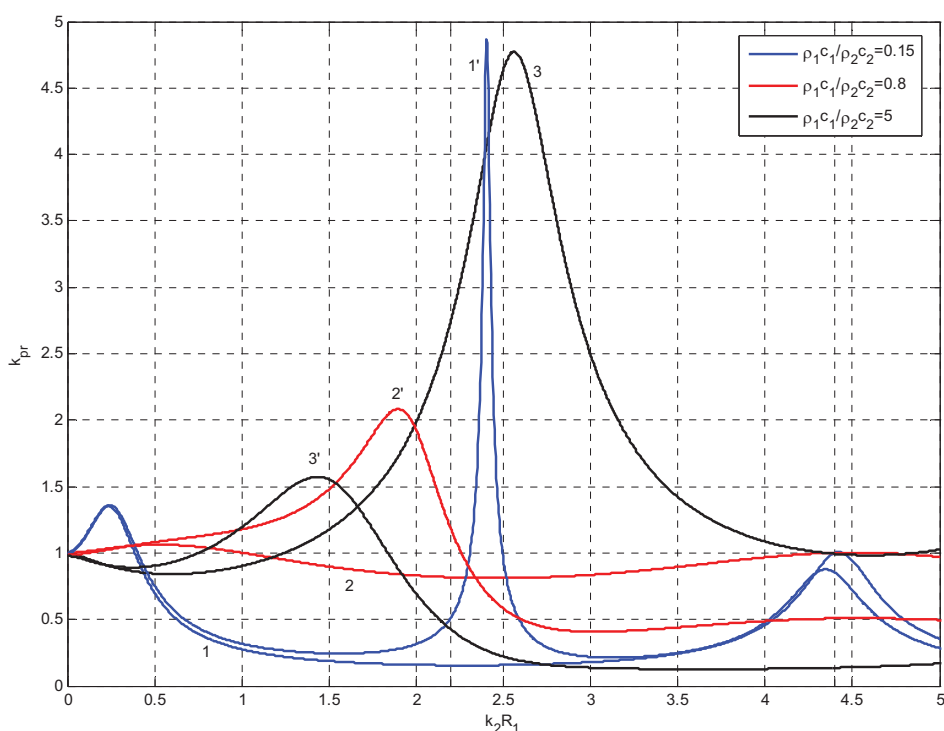


Рис. 2

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гринченко В.Т., Вовк И.В. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – К.: Наук. думка, 1986. – 240 с.