

УДК 534.3

Звукопрозрачность замкнутого кольцевого слоя в сквозной задаче излучения звука цилиндрическим источником нулевого порядка

А.В. Коржик, д-р техн. наук

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, пр. Победы, 37, Киев - 56, 030056, Украина.

Численно решена задача излучения для электроупругой модели цилиндрического гидроакустического пьезокерамического преобразователя, выполненного в виде тонкой пьезокерамической оболочки, которая полностью электродирована и размещена в упругом слое.

На примере слоев, выполненных из разнородных материалов, характеризуемых относительным волновым сопротивлением материала, исследованы частотные зависимости коэффициента прохождения по давлению и описаны его некоторые особенности в контексте рассматриваемой “сквозной” постановки задачи излучения. Библ. 9, рис. 7.

Ключевые слова: излучение звуковых волн, цилиндрическая оболочка, упругий переходной слой, импеданс излучения, коэффициент прохождения по давлению.

Введение

Предлагаемая работа является расчетным продолжением работ [1-3] и предполагает демонстрацию, анализ и обсуждение результатов расчета акустических свойств системы излучения звука вида “преобразователь - кольцевой волновой слой” в рамках сквозной постановки задачи излучения звука цилиндрическим источником нулевого порядка.

Расчету подлежит коэффициент прохождения звука цилиндрического источника нулевого порядка через упругий замкнутый кольцевой слой в диапазоне частот для типовых экранирующих элементов – замкнутых кольцевых слоев, выполненных из пористых резин, пенопластов и металлов.

Целью работы является уточнение особенностей указанного режима работы цилиндрического излучателя с использованием сквозной постановки и учетом взаимосвязи основных полей, принимающих участие в преобразовании электрической энергии в акустическую.

Условия проведения расчетов

По результатам решения сквозной задачи [1] с использованием среды САПР Matlab были проведены расчеты волновых зависимостей коэффициента прохождения по давлению k_p для различных материалов и толщин круговых волновых слоев электроупругого цилиндрического преобразователя. Указанные расчетные зависимости дополнены импедансными характеристиками преобразователя.

При расчетах использованы типовые характеристики пьезокерамик, экранирующих пористых резин, пенопластов и металлов, значения которых заимствованы из источников [4, 5].

В соответствии с постановкой задачи [1] рассмотрен бесконечно длинный соосный набор пьезокерамических круговых колец, образующий круговую тонкостенную пьезокерамическую оболочку диаметром $d_{os} = 2 \cdot R_{os} = 135 \cdot 10^{-3}$ м (рис.1) с толщиной стенки $h_0 = 6$ мм, плотностью ρ_m кг/м³ и скоростью звука c_m м/с.

Внешняя поверхность оболочки обращена в волновой слой с толщиной $h_c = R_{1s} - R_{os}$, материал которого имеет плотность ρ_c и скорость звука c_c . В работе рассмотрены две типичных ситуации в части волновых размеров слоя:

1. Толщина слоя h_c равна половине длины волны ($h_c = \lambda_c / 2$);

2. Толщина слоя h_c равна четверти длины волны ($h_c = \lambda_c / 4$), где λ_c длина волны в слое для предложенных ниже материалов.

В качестве критерия акустической жесткости структуры “слой – рабочая среда” выбрано значение относительного волнового сопротивления материала слоя: $m = \frac{\rho_c c_c}{\rho_c}$.

Значения $m > 1$ соответствуют металлам ($m = 19.2$, латунь), значения $m < 1$ - соответст-

вуют податливым середам ($m = 0.24$, пенопласт ППУ-10, $m = 0.47$, экранирующая резина 1415).

Обозначения основных характеристик материалов соответствуют приведенным в работе [1], а искомые величины - записаны в виде:

R_u безразмерная активная составляющая импеданса излучения:

$$R_u = \operatorname{Re} \left(\frac{Z_u}{1.5 \cdot 10^6} \right);$$

- X_u безразмерная реактивная составляющая импеданса излучения

$$X_u = \operatorname{Im} \left(\frac{Z_u}{1.5 \cdot 10^6} \right),$$

- k_p - коэффициент прохождения по давлению

нию $k_p = \frac{p_c}{p_0}$, где p_c - акустическое давление на внешней поверхности слоя, обращенной в рабочую среду;

- p_0 - акустическое давление на внешней поверхности оболочки.

Диапазон частот, в котором производился расчет, составлял: $f \in [0; 40000]$ Гц.

Результаты расчетов рассмотрены и проанализированы с использованием представлений о поведении электроупругих тонких оболочек вращения при радиальной поляризации в условиях электрического гармонического возбуждения (см. цепь возбуждения $U_e = U_0 e^{i\omega t}$ рис.1).

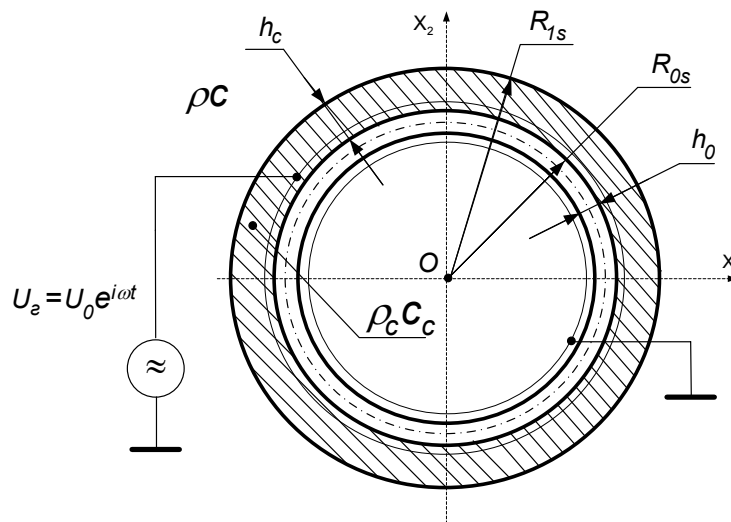


Рис.1. Схематическое изображение колебательной системы "оболочка-слой-среда"

Анализ полученных результатов

Обычно (например, работы [6, 7]), коэффициент прохождения по давлению приводится в зависимости от волновой толщины слоя $h_c r_c$, а также при условии того, что слой выполнен плоским и бесконечным по протяженности. Тем не менее, в работе [8] звукопрозрачность цилиндрического слоя оценена как функция волновых размеров собственно преобразователя kR_{os} . Заметим также, что в работе [8] приведен анализ ситуации звукопрозрачности слоя, покрывающего поверхность и цилиндрического излучателя, несколько изменяя определение оцениваемого коэффициента и искусственно предполагая постоянство колебательной скорости на поверхности излучателя во всем диапазоне рассматриваемых волновых размеров.

В результате проведенных расчетов в соответствии с выбранным режимом работы колебательной системы (излучение), в силу изменчивости волновых свойств слоя, колебательная скорость и давление на его поверхностях определяются напряженно-деформируемым состоянием системы "оболочка-слой" и для разных частот могут и не быть одинаковыми.

Характер зависимости активной R_u и реактивной X_u составляющих импеданса излучения (по результатам работ [2, 3, 8]) определяет нашу систему как многорезонансную. Именно резонансный характер колебаний обеспечивает изменение величины активной составляющей R_u , соотносимость R_u и X_u и (как следствие) изменение отражающих и звукопрозрачных качеств слоя. Поэтому результаты расчетов охватывают и импедансные характеристики. Так,

зависимости активной R_u и реактивной X_u составляющих импеданса излучения приведены

на рис. 2, 4, 6, а результаты расчета частотных зависимостей k_p - на рис. 3, 5, 7.

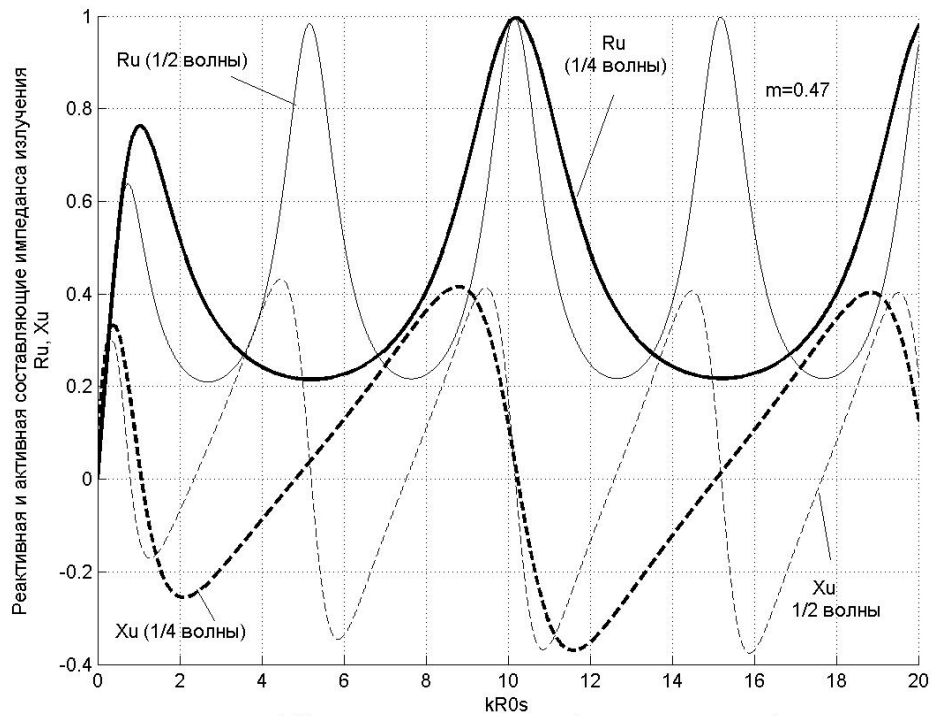


Рис.2 Импедансные характеристики преобразователя в слое (слой - экранирующая резина)

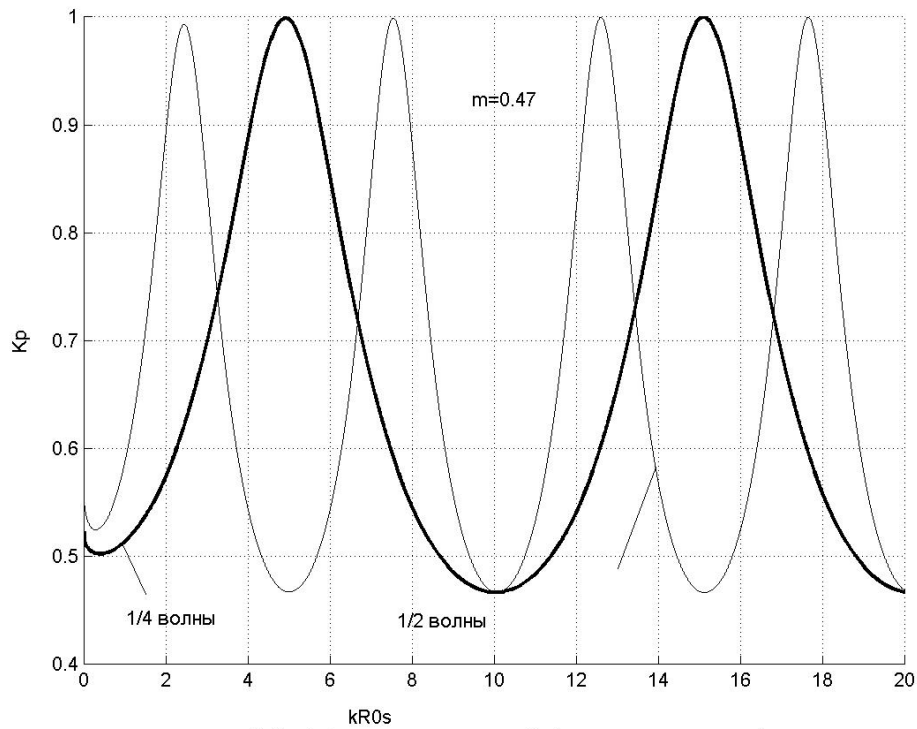


Рис. 3. Коэффициент прохождения K_p по давлению для преобразователя в слое (слой - экранирующая резина)

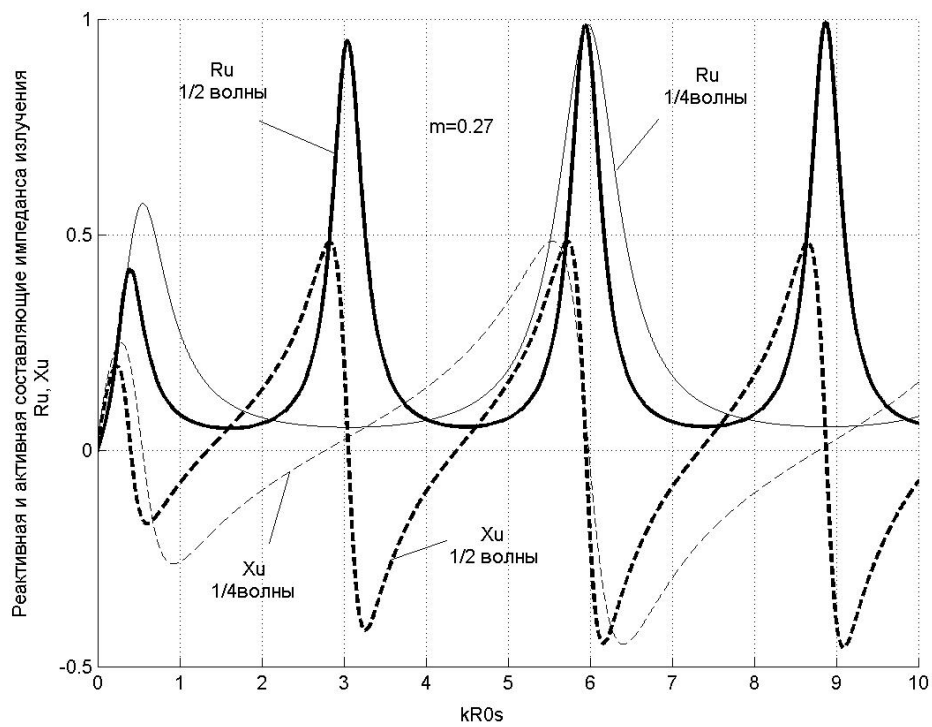


Рис. 4. Импедансные характеристики преобразователя в слое (слой – пенопласт ППУ-10)

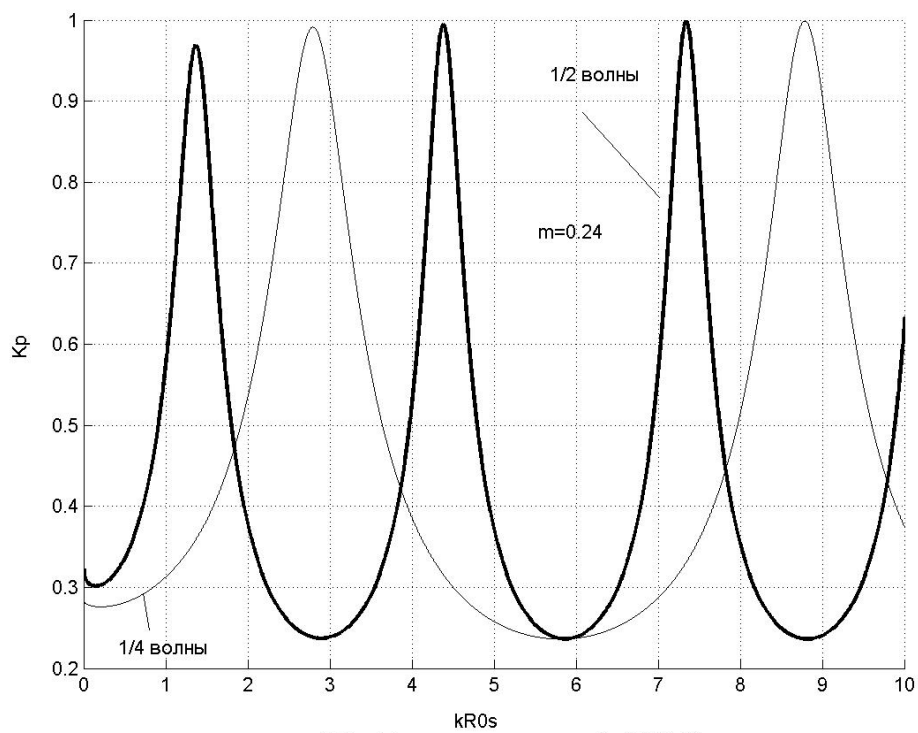


Рис. 5. Коэффициент прохождения K_p по давлению для преобразователя в слое (слой – пенопласт ППУ-10)

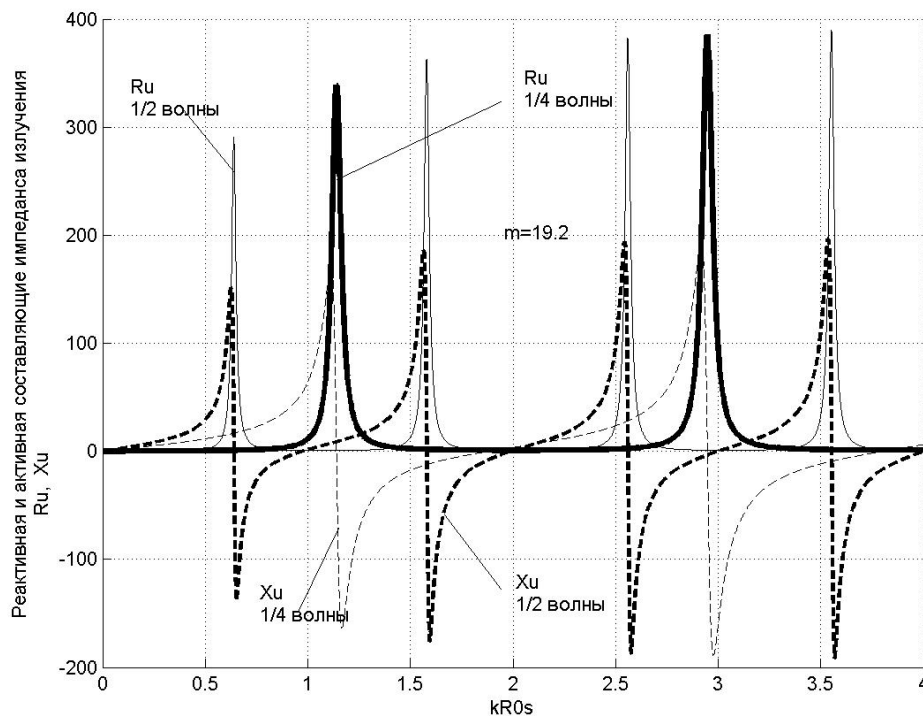


Рис. 6. Импедансные характеристики преобразователя в слое (слой – металл латунь)

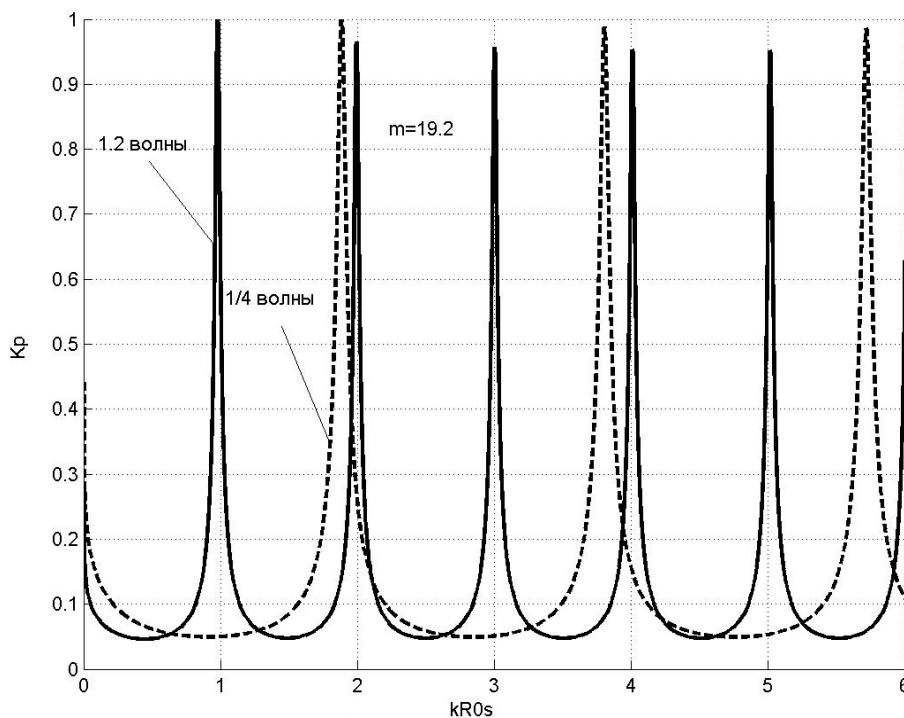


Рис. 7. Коэффициент прохождения K_p по давлению для преобразователя в слое (слой - металл латунь)

Как видно из полученных результатов, зависимости k_p от kR_{0s} (как впрочем, и от волновой толщины слоя, [6, 7]) представляют собой осциллирующие функции с определенным периодом осцилляций.

Так для полуволновых и четвертьволновых слоев, выполненных из резины 1415 (рис.2, 3) период осцилляций составляет $\frac{3\pi}{2}$ и 3π ; для полуволновых и четвертьволновых слоев, выполненных из пенопласта ППУ-10 (рис.4, 5) пе-

риод осцилляций составляет π и 2π ; а для полуволновых и четвертьволновых слоев, выполненных из латуни (рис.6, 7) период осцилляций получен как $\frac{\pi}{4}$ и $\frac{\pi}{2}$ соответственно.

При этом общим отличием указанных зависимостей для кольцевого и плоского слоев является характер R_U и X_U (а, следовательно, и k_p) в области малых значений волновых размеров излучателя ($kR_{Os} < 1$). Так в ситуации плоского слоя, в соответствии с [5], величина X_U при $kR_{Os} \rightarrow 0$ носит исключительно упругий характер, а в случае цилиндрического - X_U сначала имеет инерционный (массовый) характер, и лишь потом, переходя точку $X_U = 0$, которая соответствует антирезонансу (см. рис.2, 4, 6), приобретает характер упругости. Заметим, что в случае крайне малых толщин слоя (до $h_c = 6$ мм), расчеты (работа [2]) показывают, что слой ведет себя как сосредоточенная упругость, что соответствует существующим представлениям [9] и, в принципе, может быть использовано как предположение о равенстве давлений по всей толщине слоя [9] – от оболочки до среды.

Далее при больших значениях kR_{Os} последовательное изменение резонансных состояний системы и полученные кривые для всех расчетных ситуаций схожи с кривыми, полученными для плоских слоев (работы [6, 7]).

Отличия в низкочастотной области - есть следствие замкнутости (конечности) цилиндрического слоя и разомкнутости (бесконечности) плоского, а изменение толщины – есть одним из условий перехода от системы с сосредоточенными параметрами к системе с параметрами распределенными.

Полученные для указанных материалов зависимости коэффициента k_p показывают, что резонансные колебания слоев различной волновой толщины приводят к различной периодичности осцилляций экстремальных значений функции прохождения звука.

Как видно из рис. 3, 5, 7 существуют значения kR_{Os} , определяющие звукопрозрачность ($k_p = 1$) для слоев с $h_c = \lambda_c / 2$ и $h_c = \lambda_c / 4$ для разных частот. Положение о том, скажем, слой с толщиной $h_c = \lambda_c / 2$ (и кратной ей) звукопрозрачен и обладает входным импедансом равным импедансу среды, на которую он нагружен – находит свое подтверждение как и положение о малом значении R_U , соответствующем

ситуации $m < 1$ для нечетно кратного значения $h_c = \lambda_c / 4$.

Звукопрозрачность для области $kR_{Os} > 2$ обеспечивается периодически и возникает при совпадении текущей частоты лишь с резонансными частотами оболочки и кратными ей. Частоты антирезонансов характеризуются резким возрастанием значений R_U и приобретением слоем отражающих качеств. При этом соответствие резонансных явлений изменчивости токового режима нагружения преобразователя (равенства по амплитуде и противофазности тока смещения и тока во внешней цепи преобразователя) соответствуют положениям работы [3].

Степень уменьшения звукопроводимости слоя возрастает от 6 дБ (резина экранирующая 1415, рис 3) до 26 дБ (латунь, рис.7). Пенопласт при этом занимает промежуточную позицию (пенопласт ППУ-10, рис.5) и показывает возможное ухудшение звукопрозрачности до 20 дБ. Кроме того, значения m характеризуют степень избирательности звукопрозрачности, что и определяет собственно физическую реализацию использования полученных зависимостей и говорит о том, что чем больше m , тем менее достижимой является искомая ситуация звукопрозрачности слоя. Таким образом, периодичность обеспечения звукопрозрачности, связанная с относительным волновым сопротивлением слоя может быть достижима в основном для податливых сред и комбинированных волновых размеров слоя.

Отметим также, что для податливых сред существуют области реально используемых kR_{Os} , кратных π (рис.3, 5), для которых k_p совпадает по величине и одинаково мал.

Кроме изложенных особенностей расчеты показали отсутствие парадоксального эффекта [8], связанного с возможностью получения в области малых kR_{Os} больших давлений в сравнении с аналогичным излучателем, работающим без слоя. Расчеты показывают, что k_p в области нижних частот всегда несколько (до 5%) ниже чем для частот высших резонансов.

Действительно, общей возможной причиной такого эффекта является взаимодействие упругости слоя с присоединенной массой окружающей рабочей среды. Однако, сквозная постановка задачи излучения предполагает и учитывает естественную изменчивость колебательной скорости на границах слоя в силу связанности элементов системы “оболочка – слой - среда”, что делает невозможным в традиционных условиях возбуждения излучателя нулевого порядка

(рис.1) искусственное поддержание постоянства колебательной скорости. В связи с этим представленные в работе результаты, очевидно, приближают модельные представления условий работы к реальным и показывают ситуацию изменения напряженно-деформируемого состояния исследуемой системы в целом и связанного с этим изменения ее характеристик в частности.

Выводы

В результате выполненных расчетов и анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- полученные зависимости коэффициента прохождения звука через замкнутый волновой слой показывают и подтверждают периодический характер изменения звукопрозрачности и отражающих качеств слоя в зависимости от сочетания типичных волновых сопротивлений экранирующих круговых слоев и рабочей среды;
- показан механизм соответствия резонансных и антирезонансных областей системы акустическим свойствам слоя;
- определено, что используемые постановки открывают возможность учета взаимодействия и определения напряженно-деформируемого состояния рассматриваемой системы и характеристик основных физических полей.

Литература

1. Коржик О.В. Випромінення звуку циліндричним електропружним джерелом нульового порядку, яке розміщено в замкнутому пружному шарі // Електроніка і зв'язь. № 5.- 2012. С.30-35.
2. Коржик А.В., Куроедова Т.С., Филиппова Н.Ю. Исследование электромеханических характеристик излучающего цилиндрического пьезокерамического преобразователя с полностью электродированной поверхностью, расположенного в замкнутом кольцевом слое // Электроника и связь. № 1. – 2013. С. 102-110.
3. Коржик А.В. Особенности импедансных характеристик цилиндрического излучателя нулевого порядка, размещенного в замкнутом кольцевом слое // Электроника и связь. № 3. – 2013. С. 49-55.
4. Подводные электроакустические преобразователи. Расчет и проектирование. Справочник/ Под ред. В.В. Богородского – Л.: Судостроение, 1983. –248 с.
5. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (Розрахунок, проектування, конструювання): Навчальний посібник. – Кіровоград: "Імекс-ЛТД", 2006. – 448 с.
6. Глазнов В.Е. Экранирование гидроакустических антенн. –Л.: Судостроение, 1986. – 148 с.
7. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Маципура В.Т. Основы акустики. – К.: Наукова думка, 2007. – 640 с.
8. Гринченко В.Т., Вовк И. В. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – К.: Наук.думка, 1986. – 240 с.
9. Исакович М.А. Общая акустика.– М.: Наука, 1973. – 496 с.

УДК 534.3

Звукопрозорість замкнутого кільцевого шару в наскрізній задачі випромінювання звуку циліндричним джерелом нульового порядку

О.В. Коржик, д-р техн. наук,

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",

пр. Перемого, 37, Київ - 56, 030056, Україна.

Чисельно розв'язана задача випромінювання для електропружної моделі циліндричного гідроакустичного перетворювача, який виконано у вигляді тонкої п'єзокерамічної оболонки і яка є повністю електродованою та розміщена в пружному шарі.

На прикладі типових матеріалів екранування (гуми, пінопласти, латуні) досліджено частотні залежності коефіцієнту проходження звуку за тиском та описано особливості роботи випромінюючої системи в кільцевому шарі в контексті наскрізної задачі. Бібл. 9, рис. 7.

Ключові слова випромінювання, звукові хвилі, циліндрична оболонка, пружний хвильовий шар, коефіцієнт проходження за тиском.

UDC 534.3

The coefficient of sound penetration of 0-mode wave-stratum transducer in through-task problem .

O.V. Korzhyk, Dr.Sc.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Peremogy, 37, Kyiv - 56, 030056, Ukraine.

The problem of sound radiating by piezoceramic cylindrical shell was solved for the full-electroded and wave-stratum cylindrical transducer in through-task problem. The some results of numerical investigation was obtained, determinated and discussed in parts of penetration koeficient for the some type materials in diapason of transducer wave – sizes.

In result (for the typical shielding materials) was showed the coefficient of sound penetration characteristics adjusted interaction acoustical, mechanicsal and electrical fields. Bibl.9, fig. 7.

Keywords: *cylindrical shell, hydroacoustic piezoceramic transducer, impedance characteristics, electrode, coefficient of sound penetration.*

References

1. *Grinchenko V.T., Vovk I.V.* (1986), "The waves-tasks of sound scattering by elastic shells". Kyiv: Naukova dumka, p. 240. (Rus)
2. *Grinchenko V.T., Vovk I.V., Matsipura B.T.* (2007), "The principles of acoustics". Kyiv: Naukova dumka, p. 640.(Ukr)
3. *Glazanov V.E.* (1986), "Shielding of hydroacoustical antennas. Leningrad:. Sudostroenie". P. 148. (Rus).
4. *Ddkovsky V.S., Leyko O.G., Savin V.G.* (2006), "Electroacoustical piezoceramics transducers (Calculation, design)". Study book. Kyrovograd: "Imeks-LTD", p. 448.(Rus)
5. *Isacovich M.A.* (1973). "The common acoustic". Moscow: Nauka.p. 496. (Rus).
6. *Korzhyk O.V.* (2012), "The sound radiation by 0-mode cylindrical electroelastic wave-stratum source". Electronics and communications. No. 5. Pp. 30-35 (Ukr).
7. *Korzhyk O.V., Kuroyedova T.S. Filippova N.U.* (2013), "The investigation of electro-mechanics characteristics with full-electroded of cylindrical piezoceramics wave-stratum transducer". Electronics and communications. No. 1. Pp. 102-110 (Rus).
8. *Korzhyk O.V.* (2013), "The impedance characteristics of 0-mode wave-stratum transducer". Electronics and communications. No. 3. Pp 49-55 (Rus).
9. *V.V. Bogorodsky.* (1983), "Underwater electroacoustic transducers". Leningrad. Sudostroenie. P.248 (Rus).

Поступила в редакцію 18 мая 2013 г.