

## Акустические приборы и системы

УДК 534.3

Е.Ю. Подорожная, А.В. Святынюк, А.В. Коржик, канд. техн. наук

### Закономерности формирования направленных свойств многомодового преобразователя в присутствии акустического экрана

В работе рассмотрены особенности формирования характеристик направленности электроупругого преобразователя в присутствии электроупругого акустического экрана переменной жесткости. В качестве рабочего и рассеивающего элементов выбраны круговые пьезокерамические цилиндрические преобразователи с разрезными электродами. Задача сводится к двум расчетным вариантам: исследованию характеристики направленности электроупругого преобразователя в присутствии акустически жесткого цилиндрического рассеивателя малых волновых размеров, а также в присутствии акустически мягкого цилиндрического рассеивателя больших волновых размеров.

The formation features of directional characteristics of electroelastic transducer in the presence of the electroelastic acoustic screen with variable rigidity are considered at this work. The problem is reduced to two settlement variants: to research of the directional characteristic of the electroelastic transducer with cutting electrodes in the presence of acoustically rigid circular cylindrical scatterer of the small wave sizes, and also in the presence of acoustically soft circular cylindrical scatterer of the big wave sizes.

**Ключевые слова:** характеристика направленности, преобразователь, экран, разрезные электроды, рассеиватель, жесткость.

#### Введение

Традиционное использование для экранирования гидроакустических антенн акустических материалов в виде резин и компаундных составов имеет ряд недостатков, связанных с зависимостью их физических свойств от гидростатического давления. Поэтому применение акустических экранов на основе электроупругих преобразователей представляется перспективным при создании глубоководных гидроакустических антенн.

Формирование характеристик направленности таких приемных антенных устройств на основе электроупругих преобразователей предполагает использование метода “сквозной задачи” с привлечением общих аддитивных методов обработки сигналов. Закономерности формирования характеристик направленности многомодовых преобразователей показывают возможность исключения элементов экранировки при получении комбинационных характеристик направленности путем реализации суперпозиции мод высших порядков, как для одиночных преобразователей, так и для их систем [1]. Практический интерес представляют особенности формирования характеристик направленности рассматриваемых электроупругих преобразователей в присутствии акустического экрана с управляемыми акустическими характеристиками.

Таким образом, целью данной работы является исследование особенностей формирования характеристик направленности электроупругого преобразователя в присутствии электроупругого акустического экрана переменной жесткости.

#### 1. Постановка и решение задачи

Рассмотрим системы из круговых цилиндрических радиально поляризованных тонкостенных пьезокерамических преобразователей размещенных в идеальной жидкости. Преобразователь вакуумированный внутри. В режиме приема звуковых волн на рассмотренную систему падает плоская звуковая волна, приходящая из бесконечности. При этом исследуемым параметром является угловая зависимость электрического напряжения на нагрузочных сопротивлениях электродов электроупругого преобразователя (либо устройства суммирования указанных электрических напряжений) вида  $U_{\Sigma}(\alpha)$ , определяемых в присутствии акустического экрана. Считаем, что один преобразователь, выступающий в роли акустического экрана фактически является пассивным рассеивателем, акустической жесткостью которого можно управлять. Управление осуществляется путем

выбора резонансной частоты рассеивателя и величин его электрического нагружения электродов.

Для оценки особенностей формирования характеристик направленности антенной решетки привлечены геометрия и постановка задачи, приведенные в работах [1, 2].

Аналитическое решение предполагаемой задачи приведено в работе [2], а условия разрешения бесконечных систем алгебраических уравнений соответствуют условиям, указанным в работах [3-5].

Известно, что устремление электрического нагружения оболочки до ситуации холостого хода приводит к повышению ее жесткости [6, 7]. В случае же создания условий короткого замыкания оболочка несколько теряет жесткость. При этом возбуждение оболочки на резонансе одной из собственных форм позволяет приближенно рассматривать ее как акустически мягкий объект [8], а выбор значения частоты возбуждения не совпадающей с резонансом одной из форм, позволяет говорить об оболочке как об акустически жестком объекте [8-10]. Понимая, что обстоятельства связанности колебаний собствен-

ных форм оболочки для определенных видов электродирования и коммутации электродов исключают абсолютные приближения как к акустически жестким, так и к абсолютно податливым объектам, рассматриваемый объект полагаем упругим.

Значит, используя указанные крайние ситуации электрического нагружения, возбуждения и соотношения геометрических размеров системы, считаем в указанном приближении, что рассматриваемые общие задачи приводятся к следующим частным:

- исследование характеристики направленности электроупругого преобразователя с разрезными электродами в присутствии акустически жесткого кругового цилиндрического рассеивателя малых волновых размеров (вариант 1, рис. 1, а);
- исследование характеристики направленности электроупругого преобразователя с разрезными электродами в присутствии акустически мягкого кругового цилиндрического рассеивателя больших волновых размеров (вариант 2, рис. 1, б).

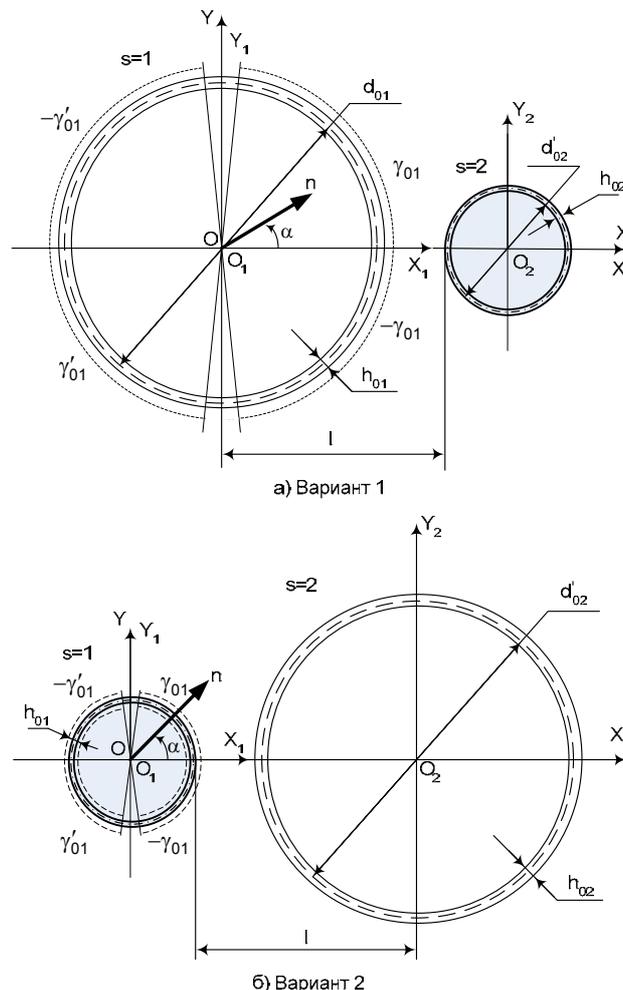


Рис. 1. Система “преобразователь – электроупругий рассеиватель”

## 2. Исходные данные и условия расчетов

Исходные данные задачи соответствуют данным, использованным в работе [2], в части выбора пьезокерамического материала, геометрии решетки и электродирования, а параметры усечения бесконечных систем алгебраических уравнений и рядов – разложений для характеристик полей – приведенным в работах [3, 4].

Для приближения условий работы рассматриваемой системы к традиционно используемому в литературе [2-4], было выбрано в качестве рабочего и рассеивающего элементов круговые цилиндрические преобразователи с диаметрами  $d_{0s} = 2r_{0s} = 2a = 67 \cdot 10^{-3}$  м и  $d'_{0s} = 2r'_{0s} = 2a = 135 \cdot 10^{-3}$  м (рис. 1, рис. 2). Толщины преобразователей выбирались как  $h_{0s} = 3 \cdot 10^{-3}$  м и  $h'_{0s} = 6 \cdot 10^{-3}$  м.

Рассматриваемые расчетные ситуации для решетки из одного преобразователя и одного рассеивателя сводятся к расчету ХН преобразователя  $s = 1$  в присутствии электроупругого рассеивателя большого диаметра  $s = 2$ , либо характеристика направленности преобразователя  $s = 2$ , а рассеивателем выступает малый преобразователь  $s = 1$ . При этом расчеты проводились для частоты резонанса нулевой формы преобразователя – рассеивателя диаметром  $d'_{0s} = 135 \cdot 10^{-3}$  м и волновых расстояний  $d/\lambda \approx 0,5$  и  $d/\lambda \approx 1,0$  и электродирования вида  $2|\gamma_{0s}| = \pi$ .

## 3. Анализ основных результатов

Рассмотрим результаты расчетов ХН мало-го электроупругого преобразователя в присутствии рассеивателя диаметром  $d'_{0s} = 135 \cdot 10^{-3}$  м, электроды которого разомкнуты. Как отмечено выше, частота возбуждения системы совпадает с частотой резонанса основной формы колебаний рассеивателя. Результаты расчетов ХН приведены на рис. 2. При этом на рис. 2, а. показаны ХН, получаемые с помощью внутреннего электрода “12” с раскрытием  $2|\gamma_{0s}| = \pi$ , а на рис. 3 б. – с помощью внешнего “11”. Электродирование указанного раскрытия обеспечивает выходное напряжение набором мод “0”, “1”, “3”, “5” ...

При этом, для ситуации работы точечного приемника у абсолютно жесткого экрана [11] характерно наличие единичного максимума ХН в направлениях  $\alpha = 90^0; 270^0$ , что в случае практического приближения поверхностей приемника

и рассеивателя говорит [11] о равенстве фазы коэффициента отражения нулю. Действительно, полученные диаграммы при сближении преобразователей вплотную (кривая 1, рис. 2, а, б) показывают достаточно большие (0,8 – 0,9) ненулевые значения ХН в указанных направлениях и высокие уровни тыльных лепестков. Таким образом, высокий уровень тыльного лепестка в области точки  $\varphi_s = 0^0$  обусловлен практически синфазностью дифрагированной на преобразователе  $s = 1$  волны и волны, рассеянной экраном  $s = 2$ . Заметим, что использование внутреннего электрода “12” при малом рассеивателе дает меньшую неравномерность ХН, чем применение внешних электродов “11”. Объясняется это затенением электрода “12” рассеивателем в направлениях  $\alpha = 180^0 \pm 60^0$  в одних и тех же условиях формирования полного поля. Заметим также, что доминируют при этом нулевая и первая формы.

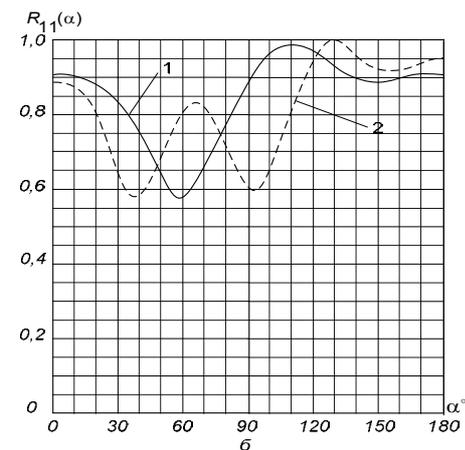
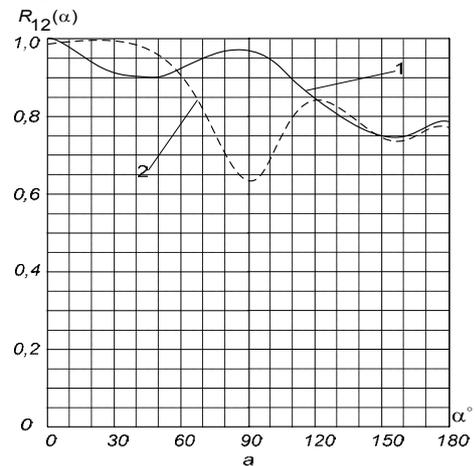


Рис. 2. Характеристика направленности  $R_{12}(\alpha)$  и  $R_{11}(\alpha)$  исследуемой системы “преобразователь – электроупругий рассеиватель”, (вариант 1) при включенных секциях “12” (а) и “11” (б) преобразователя  $s = 1$  для электродирования вида  $2|\gamma_{0s}| = \pi$  и волновых расстояний  $d/\lambda \approx 0,5$  (кривые 1) и  $d/\lambda \approx 1,0$  (кривые 2)

Увеличение расстояния между поверхностью рассеивателя и геометрическим центром приемника приводит к изменению волновой картины. Это связано с изменением интерференционных условий и перераспределением вкладов собственных форм преобразователя в результирующее колебание. Как отмечалось выше, для  $d/\lambda \approx 1,0$  свойственно некоторое ослабление первой формы. Таким образом, более весомой в выходном напряжении становится третья форма, признаков очертания которой присутствуют в диаграмме 2 рис. 2, б.

При этом наблюдается максимизация уровня тыльного лепестка, определяемая степенью жесткости рассеивателя. Безусловно, достичь ситуации полностью синфазного сложения указанных волн в нашем случае практически невозможно в силу криволинейности поверхности и неидеальности рассеивателя. Однако отмеченные особенности, связанные с учетом многододовности приближают идеализированную стандартную ситуацию [11] к реальной.

Используя в качестве рассеивателя преобразователь большого диаметра, работающий в режиме короткого замыкания, получим ХН, реализуемые при работе с внутренними (рис. 3, а) и внешними (рис. 3, б) электродами.

В этом случае, вследствие использования акустически податливого рассеивателя, уровень тыльного лепестка должен уменьшаться, что, в частности, объясняется тем, что фаза коэффициента отражения от такого экрана равна  $\pi$ . Наиболее предпочтительным при этом считается такое удаление приемника от экрана, при котором  $k/l = \pi/2$ , где  $l$  – расстояние от геометрического центра приемника до экрана (рис. 1). Это дает возможность в случае использования точечного приемника и идеально податливого плоского экрана добиться нулей ХН в траверзных направлениях  $\alpha = 90^\circ; 270^\circ$  [11]. В рассматриваемой ситуации, практически для всех диаграмм наблюдается минимум ХН в указанных траверзных направлениях, а также значительное (до 6 – 8 дБ) изменение тыльного лепестка. С уменьшением расстояния до экрана (направление  $\varphi_s = 180^\circ$  приемника  $s = 1$ ) уровень тыльного лепестка падает, что говорит об уменьшении относительной чувствительности приемника. Не меняя вид электродирования, а, значит, не изменяя модовый состав, определяющих выходное электрическое напряжение на нагрузке электрода, заметим, что использование малого преобразователя обуславливает схожесть ХН по форме и отсутствие признаков высших

форм. Это связано с тем, резонанс нулевой формы рассматриваемого преобразователя расположен в районе 17 кГц, что более чем на октаву отлично от частоты резонанса нулевой формы экрана. Таким образом, на рассматриваемой частоте  $f = f_{00}$  доминируют основная и первая формы. Высшие же формы в силу слабой связанности для данной частоты практически не влияют на результирующее значение электрического напряжения даже при удалении экрана на расстояние  $d/\lambda \approx 1,0$  и связанное с этим ослабление влияния первой формы.

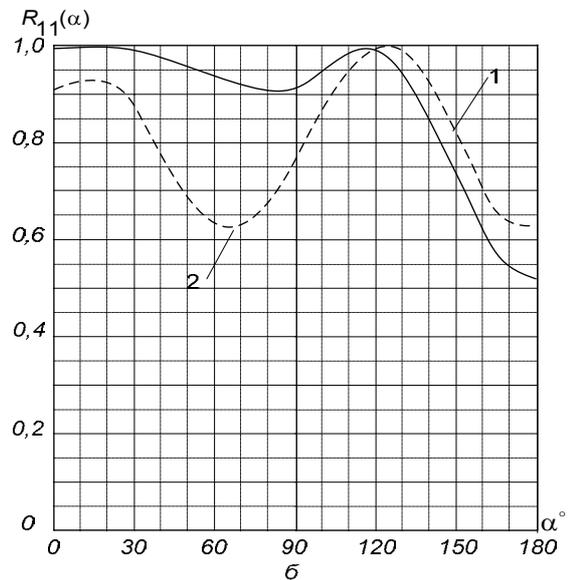
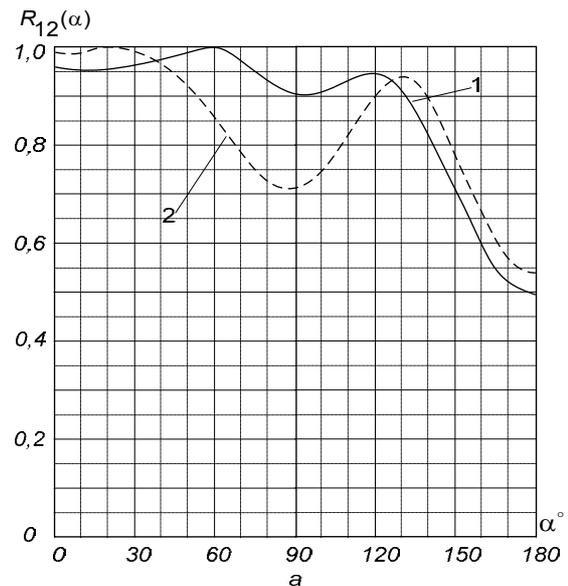


Рис. 3. Характеристика направленности  $R_{12}(\alpha)$  и  $R_{11}(\alpha)$  исследуемой системы “преобразователь – электроупругий рассеиватель”, (вариант 2) при включенных секциях “12” (а) и “11” (б) преобразователя  $s = 1$  для электродирования вида  $2|\gamma_{0s}| = \pi$  и волновых расстояний  $d/\lambda \approx 0,5$  (кривые 1) и  $d/\lambda \approx 1,0$  (кривые 2)

Таким образом, наиболее радикальным подходом с точки зрения использования пространственных свойств набора собственных форм, очевидно является ситуация “Варианта 1”, а компромиссной будет ситуация использования рассеивателя с электроупругими свойствами, которые аналогичны свойствам приемника.

### Выводы

Таким образом, использование рассеивающих элементов с управляемыми акустическими свойствами в составе глубоководных антенн позволяет:

- получить для преобразователя, работающего совместно с электроупругим рассеивателем, характеристику направленности с регулируемым уровнем тыльного лепестка как за счет выбора формы, геометрии расположения и акустических свойств рассеивателя, так и за счет управления проявлением направленных свойств форм колебаний высших порядков;
- считать одним из главных факторов, обуславливающих формирование направленных свойств многомодовых электроупругих круговых цилиндрических преобразователей, работающих у упругих рассеивающих поверхностей, – частотные (амплитудные и фазовые) характеристики преобразователя и рассеивателя;
- исключить в предложенных расчетных ситуациях схему использования абсолютно податливого рассеивателя при работе в паре с малым электроупругим преобразователем в виду невозможности реализации в этом случае направленных качества мод высших порядков указанного приемника;
- обогащение модового состава и управление пространственными свойствами такой системы при реализации пространственной избирательности высших мод целесообразно проводить для случая использования в качестве рассеивателей электроупругих объектов с резонансными свойствами близкими к резонансным свойствам активных преобразователей.

### Литература

1. Коржик А.В., Солтановский Ю.О. Излучение звуковых волн секционированным цилиндрическим преобразователем, подключенным к длинной линии // *Электроника и связь*. – 2009. – № 6. – С. 54–59.
2. Коржик О.В., Лейко О.Г. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електропружних циліндричних перетворювачів // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, – 2001. – №4. – С.106-114.
3. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики, – Л.: Судостроение, 1972. – 352 с.
4. Подводная акустическая аппаратура и устройства. Т.2. Технология акустических антенн / Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Шамарин А.Ю., Ткаченко В.П. – К.:ГК ППУ, 2001. – 256 с.
5. Гринченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основы акустики. – К.: Наукова думка, 2007. – 640с.
6. Гринченко В.Т., Сенченко И.В. Излучение звука частично экранированными оболочками // *Прикл. механ.* – 1982. – Т.18. – №2. – С. 15-18.
7. Сенченко И.В. Рассеяние звука пьезокерамической цилиндрической оболочкой вблизи жесткой поверхности // *Прикл. механ.* – 1984. – Т.20. – №7. – С. 111-114.
8. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики, – Л.: Судостроение, 1972. – 352 с.
9. Коржик О.В., Лейко О.Г. Дослідження акустичних характеристик одиночного п'єзокерамічного циліндричного перетворювача при розв'язанні задачі прийому в наскрізній постановці // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, – 2002. – №5. – С.105-113.
10. Коржик А.В. Применение метода “сквозной задачи” к исследованию амплитудно-частотных зависимостей характеристик акустического поля приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя // *Электроника и связь*. – 2010. – № 3. – С. 160–166.
11. Глазанов В.Е. Экранирование гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, – 1986. – 148 с.