

## Исследование электрических полей приемного пьезокерамического преобразователя с согласующим слоем

Н.Ю. Филиппова, А.В. Коржик

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина*

(Получено 21.02.2017; опубликовано online 27.07.2017)

Получены амплитудно-частотные характеристики чувствительности приемного пьезокерамического цилиндрического преобразователя (который расположен в замкнутом волновом слое) с учетом реакции волнового слоя, условий электродирования, режима электрического нагружения и электроупругих свойств колеблющейся электроупругой системы. Установлено, что управление параметрами частотной характеристики возможно путем подбора электрической нагрузки электронной схемы, изменением толщины слоя и выбора материала слоя.

**Ключевые слова:** Пьезокерамический преобразователь, Оболочка, Волновой слой, Амплитудно-частотные характеристики, Электрическое поле, Электроупругие свойства, Акустическое поле, Электродирование, Чувствительность, Прием звука, Полуволновой слой, Четвертьволновой слой.

DOI: 10.21272/jnep.9(4).04027

PACS number: 43.38.n

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные подводные электроакустические преобразователи имеют достаточно сложные конструкции, реализация которых связана с необходимостью решения технологических задач, формализации расчетных условий закрепления колебательной системы, герметизации, электродирования и размещения элементов электрического монтажа, а также обеспечения заданной чувствительности. Решение указанных технологических задач непосредственно связано с изучением особенностей формирования в преобразователе взаимосвязанных акустических, механических и электрических полей с учетом слоевых конструктивных особенностей средств согласования, экранировки, а также технологических элементов. Очевидно, нельзя отрицать того, что с изменением геометрических характеристик, а также инерционных и упругих свойств согласующих и экранирующих слоев, наблюдается изменение волнового размера сечения рассеяния колебательной системы преобразователя-приемника и, соответственно, условий формирования полного акустического поля [1]. Очевидно также, что это связано с изменением режима колебаний пьезоэлемента и как следствие – видоизменением характера и пространственной ориентации рассеянного поля. Порядок формирования полного и рассеянного полей объектов различного типа без учета взаимодействия акустических, механических и электрических полей достаточно широко представлены в традиционной акустической периодике. Упомянем при этом работы [2-4], а некоторые основные положения решения предлагаемой электроупругой задачи сквозного типа, учитывающей особенности взаимодействия указанных физических полей для приема и излучения звука, изложены в работах [5-7].

Предлагаемая работа посвящена определению особенностей частотных характеристик чувствительности приемного цилиндрического преобразователя, представленного тонкостенной электроупругой (пье-

зокерамической) оболочкой со сплошным внешним и незамкнутым внутренним электродами, которые подключены к внешней активной электрической нагрузке. Преобразователь работает в замкнутом кольцевом слое, который представляет собою согласующее устройство и обеспечивает в тоже время гидро- и электроизоляцию колебательной системы. Согласующий слой является пассивным конструкторско-технологическим материалом, который используется при проектировании гидроакустических преобразователей и представляет собой кольцо с определенными геометрическими характеристиками, выполненное из акустически мягких, импедансных или акустически жестких материалов. С точки зрения электрического состояния слой является диэлектриком, значение сопротивления изоляции которого (в составе конструкции) не меньше чем 100 МОм. Если слой выполнен с металлических материалов, то конструктивно предусматривается дополнительная электроизоляция внешней электродированной поверхностью (далее – электрод).

Формально, данная статья является продолжением работы [5], в которой построена математическая модель и решена сквозная задача о приеме звука цилиндрическим электроупругим приемником, учитывающая эффекты упругого взаимодействия цилиндрической оболочки, расположенной в кольцевом волновом слое, с окружающей средой с использованием классической теории пьезоэлектричества, соответствующих ей упрощенных уравнений Максвелла, уравнений для акустического поля (уравнения Гельмгольца), а также силовых и кинематических условий сопряжения на поверхности “цилиндрическая оболочка – рабочая среда”. При постановке задачи использованы базовые положения работ [8, 9].

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предполагается, что в идеальной малосжимаемой жидкости с плотностью  $\rho$  и скоростью звука  $c$  размещена колебательная система, состоящая из

одиночного пьезокерамического цилиндрического преобразователя бесконечной длины, который расположен в замкнутом волновом кольцевом слое. Преобразователь представляется круговой электроупругой, радиально поляризованной оболочкой радиуса  $R_{0s}$  с толщиной стенки  $h_{0s} = R_{1s} - R_{0s}$  (рис. 1). Внутри преобразователя – вакуум.

Прием и переизлучение звука происходит через замкнутый кольцевой слой радиуса  $R_{1s}$ . Предполагается, что материал слоя не сопротивляется сдвиговым деформациям, а его акустические свойства характеризуются плотностью  $\rho_1$  и скоростью звука  $c_1$ .

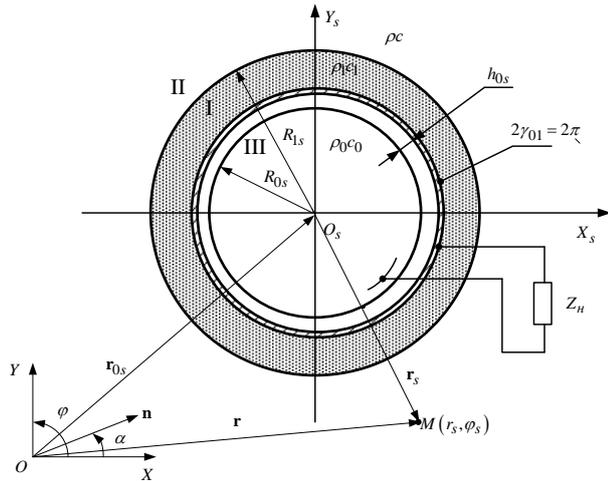


Рис. 1 – Пьезокерамический преобразователь и система координат

В результате применения метода частичных областей рассмотрим ряд областей: I, II, III (рис. 1) так, что область I ( $R_{0s} \leq r_s \leq R_{1s}$ ) соответствует замкнутому волновому слою, область II ( $R_{1s} \leq r_s < \infty$ ) – рабочей среде, область III ( $r_s \leq R_{0s}$ ) – внутреннему объему цилиндра. Вследствие условия внутренней вакуумизации акустическое поле в области III отсутствует.

Внешней нагрузкой колеблющейся системы является идеальная среда (область II, рис. 1), в которой распространяются акустические волны, описываемые уравнением Гельмгольца, записанным для волнового потенциала  $\Phi_{II}(r_s, \varphi_s)$ :

$$\Delta \Phi_{II}(r_s, \varphi_s) + k^2 \Phi_{II}(r_s, \varphi_s) = 0 \quad (1)$$

где  $\Phi_{II}(r_s, \varphi_s)$  – волновой потенциал,  $k$  – волновое число;  $\Delta$  – оператор Лапласа для цилиндрической системы координат.

Полагаем, что в замкнутом кольцевом слое (область I, рис. 1) поле также удовлетворяет уравнению Гельмгольца вида:

$$\Delta \Phi_I(r_s, \varphi_s) + k_1^2 \Phi_I(r_s, \varphi_s) = 0 \quad (2)$$

Где  $\Phi_I(r_s, \varphi_s)$  – волновой потенциал в слое;  $k_1$  – волновое число для материала слоя.

В режиме приема падающая волна, достигнув поверхности кольцевого слоя, вызывает появление в области II отраженной волны  $\Phi_{II}(r_s, \varphi_s)$ . При этом в кольцевом слое вследствие многократного переотражения волн от его внешних и внутренних границ возникает поле  $\Phi_I(r_s, \varphi_s)$ , которое определяется бесконечной суммой волн, распространяющихся навстречу друг другу. Так пьезоэлемент деформируется вследствие возникновения упругих волн в кольцевом слое, которые, в свою очередь, порождают внешним к слою акустическим воздействием.

Координатные системы задачи включают – общую прямоугольную систему координат  $OXYZ$ , расположенную, так что ось  $OX$  лежит в плоскости преобразователя, а ось  $OZ$  параллельна продольной оси цилиндра;

– локальную и прямоугольную систему координат  $O_s X_s Y_s Z_s$ , которые одинаково ориентированные в пространстве, причем оси  $O_s Z_s$  совпадают с продольными осями соответствующих цилиндрических оболочек.

– локальную  $R\varphi Z$  круговую цилиндрическую систему, связанную с прямоугольной системой известными формулами.

Уравнения состояния пьезоэлектрической керамики, характер колебаний механической колебательной системы преобразователя в напряжениях и компоненты тензора деформации и вектора перемещений удовлетворяют условиям приведенных в работах [8, 9].

Определение граничных условий задачи по электрическому полю при нагружении электрода на внешнее электрическое сопротивление  $Z_n$  соответствует [5, 8, 9]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_S (\mathbf{n} \cdot \mathbf{D}) dS = -\frac{U_n}{Z_n} \quad (3)$$

где  $U_n$  – разность потенциалов на нагрузке  $Z_n$  электрода;  $D$  – вектор электрической индукции;  $S$  – площадь электродированной поверхности (в данной расчетной ситуации  $2y = 2\pi r$ ).

Компоненты вектора электрической индукции  $D$  определяются исходя из геометрии электрода. При этом на внутренней и внешней поверхности преобразователя для радиальной и угловой составляющих вектора электрической индукции  $D$  выполняется условие:

$$D_\varphi = D_z = 0$$

где  $D_\varphi$ ,  $D_z$  – окружной и меридиональный компоненты вектора электрической индукции. То есть вектор электрической индукции будет определяться лишь радиальной компонентой –  $D_r$ .

Для режима холостого хода выражение (3) примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_S (\mathbf{n} \cdot \mathbf{D}) dS = 0 \quad (4)$$

Условие (4) определяет ситуацию, когда  $I_n = 0$ .

При замыкании электродов происходит выравнивание зарядов на них, что сопровождается мгновенным уменьшением разности потенциалов. Следовательно, напряженность электрического поля  $E_r$  ( $E_r$  – радиальная составляющая напряженности электрического поля) будет уменьшаться мгновенно до значения  $E_r = 0$ .

Электрическое состояние деформируемой пьезоэлектрической оболочки удовлетворяет упрощенным уравнениям Максвелла [7, 9]. При этом электрическое напряжение в выражении (1), определяемое в результате решения «сквозной» задачи о приеме звука, представляется, используя функцию включения, в виде

$$U_n = U_n f_1(\varphi_s),$$

где  $f_1(\varphi_s) = B \cdot \text{rect}\left(\frac{2\gamma_{0s}}{\varphi_s}\right)$  – кусочно-непрерывная функция, которая предполагает зависимость от  $\varphi_s$  и определяет положение электрода на поверхности преобразователя, а также величину его углового раскрытия  $m$ -го электрода.

Составляющая электрического поля в пьезокерамике  $E_{rs}$  определяется из условия:

$$U_n = - \int_{-\frac{h_{0s}}{2}}^{\frac{h_{0s}}{2}} E_{rs} |_{2\gamma_{01}} dh$$

Поверхностная плотность электрического заряда определяется компонентом вектора электрической индукции, который ориентирован вдоль нормали к электродированной поверхности пьезоэлектрической оболочки, получим:

$$Q = \int_S \mathbf{D} dS \Rightarrow A \int_{-\gamma_{0s}}^{\gamma_{0s}} D_r d\varphi_s,$$

где  $dS = A d\varphi_s$ .

Для оболочки с радиальной поляризацией в соответствии с [8] электрическая индукция  $D_r$  выражается через уравнения состояния следующим образом

$$\left\{ \begin{aligned} B_m &= \frac{\xi_{R_{1s}}^m(\omega) - \Delta_{R_{0s}}^m(\omega) \beta_{R_{1s}}^m(\omega)}{\xi_{R_{1s}}^m(\omega) - \beta_{R_{1s}}^m(\omega) \Delta_{R_{0s}}^m(\omega)}; \\ A_m &= -B_m \Delta_{R_{0s}}^m(\omega); \\ E_m &= \frac{k_1 [A_m I'_m(k_1 R_{1s}) + B_m N'_m(k_1 R_{1s})] - i^m e^{-ima} I'_m(k R_{1s})}{H'_m(k R_{1s})}; \\ V_m &= -i W_m \frac{M_m}{F_m(\omega)}; \\ W_m &= -i \frac{k_1}{\omega} (A_m I'_m(k_1 R_{0s}) + B_m N'_m(k_1 R_{0s})). \end{aligned} \right.$$

$$D_r = \varepsilon_{33}^s E_r + e_{31} (\varepsilon_\varphi + \varepsilon_z),$$

где меридианальный компонент тензора деформаций  $\varepsilon_z$  равен нулю (в силу бесконечности оболочки)

$$\varepsilon_z = \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0.$$

Для предлагаемой конкретной расчетной ситуации – случая полного электродирования, с учетом свойств полноты и ортогональности напряженность электрического поля:

$$E_{rs} = E_{rs} |_{2\gamma_{01}} = -\frac{U_n}{h_0} \cdot 2\pi \quad (5)$$

Заметим, что справедлива ситуация  $\frac{\partial E_{rs}}{\partial \varphi_s} = 0$  так

как изменения  $E_{rs}$  по углу для такого вида электродирования отсутствует.

Определим  $U_n$  как падение напряжения в цепи нагрузки электрода:

$$I_n = -\frac{U_n}{Z_n} = \int_S \frac{\partial D_r}{\partial t} dS = \int_0^{2\pi} (i\omega) D_r d\varphi_s,$$

где  $D_r$  – электрическая индукция имеет вид:

$$D_r = \varepsilon_{33} E_r + e_{31} \left\{ W_s \frac{1}{R_{0s}} + \frac{1}{R_{0s}} \frac{\partial V_s}{\partial \varphi_s} \right\}$$

Таким образом, напряженность электрического поля (5) определяется частотно зависимым характером деформаций, что практически полностью определяет частотно зависимое изменение радиального компонента вектора электрической индукции:

$$E_{rs} = -\frac{i\omega Z_n A e_{31} 2\pi}{i\omega \varepsilon_{33} A Z_n 2\pi - h_{0s}} W_m$$

В результат совместного решения перечисленных систем уравнений дает возможность определить характеристики преобразователей с учетом связанности всех трех полей – электрического, механического и акустического для случая стационарных задач:

Данная система уравнений определяет неизвестные коэффициенты приведенных выше разложений, которые дают возможность отыскать основные характеристики акустических, механических и электрических полей пьезокерамического преобразователя с учетом упругих и инерционных свойств волнового слоя.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Представление приемного преобразователя в виде датчика-генератора электрической энергии предполагает определение амплитудно-частотных характеристик электрических полей в виде чувствительности как модуля напряжения на выходных клеммах пьезокерамического преобразователя-оболочки, отнесенного к давлению в окружающем акустическом поле.

$$\gamma = \left| \frac{U_n}{p} \right|,$$

где  $U_n$  – электрическое напряжение на внешней нагрузке  $Z_n$ .  $p$  – внешнее акустическое поле, образованное вследствие рассеяния плоской волны с учетом реакции слоя, условий электродирования поверхностей пьезокерамической оболочки, режима электрической загрузки и электроупругих свойств колеблющейся оболочки.

Полное поле в рабочей среде с учетом (1) и (2) определяется как:

$$p_{II} = p_0 + p_s = -i\omega\rho \left[ \sum_n E_n H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s} + e^{ik(nr_{0s})} e^{ik(nr)} \right]$$

При условии совпадения центров общей и локальной системы координат  $O$  и  $O_s$  (т.е.  $r_{0s} = 0$ ), плоская падающая волна  $p_0$  имеет вид

$$p_0 = \sum_n i^n I_n(kr_s) e^{in\varphi_s} e^{-ina},$$

где  $n = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$ ;  $a$  – угол падения плоской звуковой волны;  $\varphi_s$  – окружная координата;  $I_n(kr_s)$  – функция Бесселя первого рода  $n$ -го порядка;

Полное поле в области II в локальных координатах  $s$ -го цилиндра запишем как

$$p_{II} = -i\omega\rho * \left[ \sum_n E_n H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s} + \sum_n i^n I_n(kr_s) e^{in\varphi_s} e^{-ina} \right]$$

В области I в координатах  $s$ -го цилиндра радиальная нагрузка оболочки со стороны слоя представляется акустическим воздействием вида:

$$p_I = -i\omega\rho_1 \left[ \sum_n (A_n I_n(k_1 r_s) + B_n N_n(k_1 r_s)) e^{in\varphi_s} \right]$$

Сопротивление  $Z_n$  в общем случае является комплексным ( $Z_n = R_n + iX_n$ , где  $R_n$  и  $X_n$  – активные и реактивные составляющие общего сопротив-

ления  $Z_n$ ). При этом неизвестной является разность потенциалов  $\Delta\Psi = U_n$  и ток проводимости  $I_{np}$  во внешней цепи. Заметим, что ток проводимости внешней цепи соответствует направленному движению свободных зарядов в проводниках внешней цепи. При этом ток смещения в пьезокерамике и ток проводимости рассматриваются относительно точек подключения электродов преобразователя к электрической линии нагрузки. Таким образом, ток для внешней цепи электрической цепи нагрузки электрода будет определяться по закону Ома уравнением:

$$I_{np} = \frac{U_n}{Z_n}$$

Как известно (например [8]), ток смещения  $I_D$  пропорционален скорости изменения электрической индукции  $D(D_r, D_\varphi, D_z)$ . Он возникает при изменении напряженности электрического поля и характеризует смещение зарядов, которые связаны со структурой материала (в данном случае – пьезоматериала). Таким образом, ток смещения определяется поляризацией материала и соответствующим движением связанных зарядов.

Рассмотрим результаты расчета амплитудно-частотных зависимостей чувствительности  $\gamma$ . На рис. 2 – 4 показано семейство кривых, которые отображают частотные зависимости модуля чувствительности для колебательной системы, преобразователь которой заключен в полуволновый либо четвертьволновой слой.

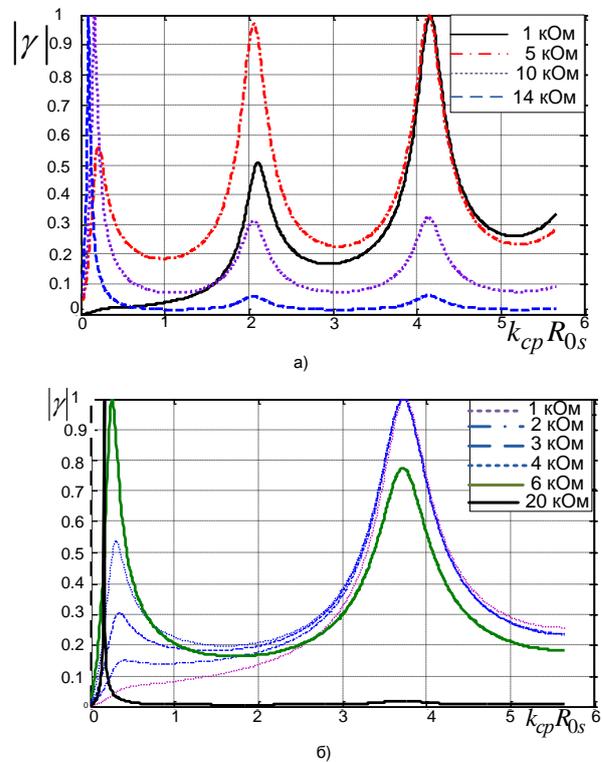


Рис. 2 – Чувствительность колебательной системы с полуволновым (а) и четвертьволновым (б) слоем (материал ПЗУ-10)

При этом исследуются ситуации для разных относительных волновых сопротивлений материала слоя  $m$  (ППУ-10, резина и сталь), который введен в качестве критерия акустической жесткости структуры «слой – рабочая среда»  $m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$ .

Таким образом, деформируемая цилиндрическая оболочка под воздействием внешнего акустического поля характеризуется специфическим напряженно-деформированным состоянием сжатия-растяжения вдоль полярной угловой координаты  $\varphi$ . Частотно зависимое изменение деформаций практически полностью определяет частотно зависимое изменение радиального компонента вектора электрической индукции, который формирует выходной электрический сигнал пьезокерамической оболочки для рассмотренной ситуации электродирования поверхностей (полное электродирование  $|2\gamma_{0s}| = 360^\circ$ ).

Электрическая поляризация деформируемой пьезокерамической оболочки полностью определяется радиальным компонентом вектора электрической индукции, а электрический заряд формируется на электродированной поверхности оболочки в отсутствии свободных носителей электричества в материале керамики.

Так, для полуволнового слоя при коротком замыкании ( $Z_n = 1$ ) АЧХ характеризуется тремя резонансными пиками, которые являются отличными друг от друга в области малых значений волновых размеров приемника  $k_{cp}R_{0s}$ .

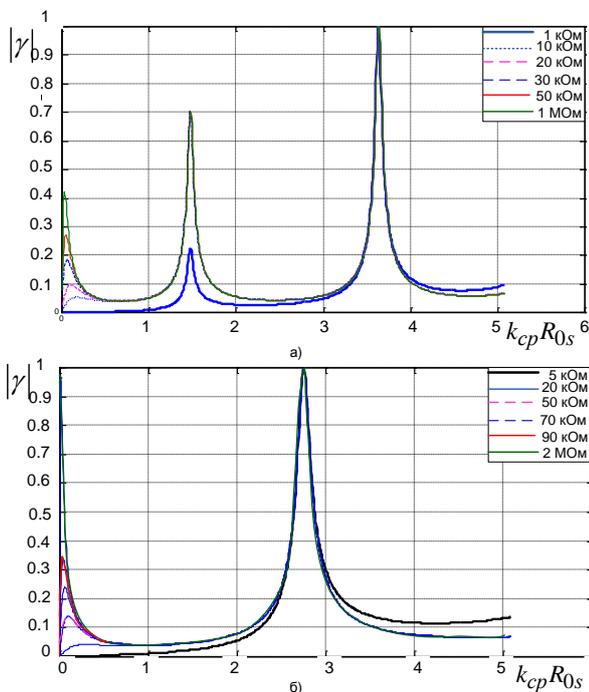


Рис. 3 – Чувствительность колебательной системы с полуволновым (а) и четвертьволновым (б) слоем (материал – сталь)

Как видно из представленных результатов АЧХ чувствительности для полуволнового слоя (рис. 2)

колебательная система является многорезонансной, при чем резонансные области могут возникать при совпадении текущей частоты с резонансными частотами оболочки.

Так, при данной волновой толщине для расчетного частотного диапазона получено три частотные области:

- первая область значений  $k_{cp}R_{0s} = 0.2$ , амплитуда которой растет при увеличении значения электрической нагрузки;
- вторая область значений  $k_{cp}R_{0s} = 2.1$ , совпадает с частотой резонанса нулевой формы колебаний пьезокерамической оболочки заданного размера и выбранного материала;
- третья область значений  $k_{cp}R_{0s} = 4.2$ , обусловлена наличием согласующего волнового слоя.

При этом изменение значения активной составляющей электрического сопротивления  $Z_n$  ведет к увеличению либо снижению амплитуд электрической чувствительности в соответствующих областях. Так, для первой области амплитуда чувствительности наименьшая при  $Z_n = 1$  ед., а наибольшая при  $Z_n = 40$  ед.

Таким образом, по мере увеличения  $Z_n$  происходит общее снижение уровня чувствительности с одновременным сглаживанием частотной характеристики во всем исследуемом частотном диапазоне. При этом наибольшие отличия наблюдаются при малых значениях  $k_{cp}R_{0s}$ . Уменьшение чувствительности обусловлено силами упругого взаимодействия, которые соизмеримы с силами кулоновского взаимодействия, что говорит о рассогласовании сопротивления нагрузки. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше играют роль упругие эффекты в части влияния на ток смещения.

АЧХ чувствительности (рис. 2) для полуволнового слоя, выполненного из ППУ-10, является периодичной функцией волнового радиуса преобразователя. При этом период функции  $\gamma(f)$  для четвертьволнового слоя больше в два раза, чем для полуволнового слоя.

Для колебательной системы с четвертьволновым слоем амплитудно-частотная зависимость чувствительности показывает наличие двух частотных резонансных областей (рис. 2, б). Так, при данной волновой толщине амплитуды АЧХ не совпадают с резонансом нулевой моды колебаний пьезокерамической оболочки как для полуволнового слоя. При  $Z_n = 1$  ед. на диаграммах наблюдается один амплитудный пик в области  $k_{cp}R_{0s} = 3.8$ , что обусловлено изменением волновых размеров колебательной системы по сравнению с предыдущей ситуацией. Так, увеличение значения электрического сопротивления до значения  $Z_n = 6$  ед. приводит к возрастанию амплитуды чувствительности в низкочастотной области  $k_{cp}R_{0s} = 0.3$  с одновременным уменьшением уровня чувствительности в области  $k_{cp}R_{0s} = 3.8$ . Дальней-

шее увеличение  $Z_n$  сказывается на подавлении амплитуды в области  $k_{cp}R_{0s} = 3.8$ .

Схожей является ситуация и для слоя, выполненного из стали (рис. 3).

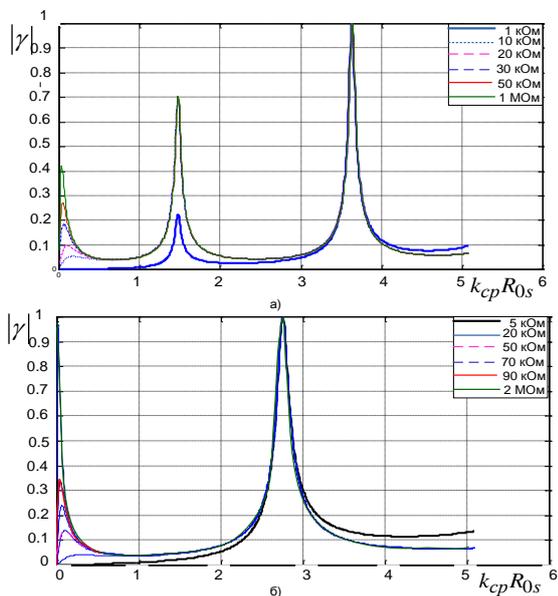


Рис. 3 – Чувствительность колебательной системы с полуволновым (а) и четвертьволновым (б) слоем (материал – сталь)

Изменим материал слоя, а, следовательно, волновые параметры колебательной системы и оценим ситуацию на примере пористой резины 51-1415 (рис. 4).

Как видно из представленных результатов при использовании полуволнового слоя кривая частотной характеристики приобретает большее количество пиков по сравнению с кривыми для четвертьволнового слоя, что определяет колебательную систему как широкополосную. При этом в данной полосе частот при увеличении значения активной составляющей электрического сопротивления происходит сглаживание частотной характеристики за счет роста уровня чувствительности в низкочастотной области.

Добавим, что угловое распределение акустического поля в ситуации учета электроупругих свойств тракта “поле давления – напряжение на нагрузке” [1] существенно отличается от распределений, полученных при решении традиционным путем задач рассеяния звука на цилиндре [2].

Отличительной особенностью каждой из диаграмм является наличие низкочастотного пика амплитудно-частотной характеристики чувствительности, который видоизменяется при увеличении электрической нагрузки.

Таким образом, неравномерность частотной характеристики обусловлена сочетанием волновых сопротивлений материала слоя и окружающей среды, а изменение толщины слоя, как было указано выше, приводит к изменениям звукопрозрачности слоя, что неизменно влияет на электрическое напряжение на выходе. Взаимодействие упругости цилиндрической оболочки, слоя и присоединенной массы

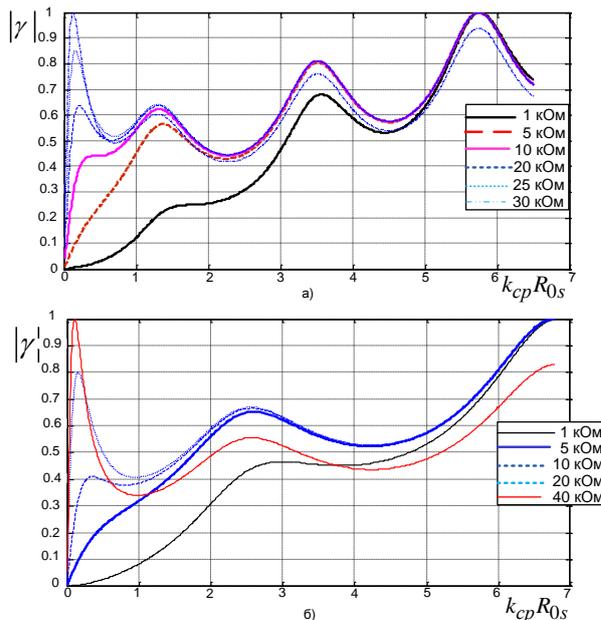


Рис. 4 – Чувствительность колебательной системы с полуволновым (а) и четвертьволновым (б) слоем (материал – резина)

среды, а также многомодовость колебательной системы обеспечивает особое влияние на электрические характеристики преобразователя для различных технологичных материалов слоя, что сказывается поразному на диаграммах чувствительности. В результате расчетов показано, что управление параметрами частотной характеристики возможно путем подбора электрической нагрузки электронной схемы, которая подключается непосредственно электродам электроупругого преобразователя, изменением толщины слоя (что приводит к изменению волновых размеров колебательной системы) и выбора технологических материалов.

### ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено, что:

- условия работы оболочки в акустической среде (фактически соответствующие взаимодействию самой пьезокерамической оболочки, слоя и жидкости) определяются в общем случае взаимодействием их упругостей и присоединенной массы среды, физическими характеристиками слоя, условиями электрического нагружения, а также многомодовостью колебательной системы, что и обеспечивает возможность управления параметрами частотной характеристики чувствительности цилиндрического преобразователя;
- особенностью расчетной ситуации является возникновение низкочастотного пика частотной характеристики, величина которого регулируется величиной электрического нагружения;
- изменение инерционных и упругих характеристик согласующего слоя, его толщины, а также величины электрической нагрузки обуславливает формирование окружающего преобразователь акустического поля – как многомодового. Это дает возможность определить чувствительность преобразователя, исходя из реальной картины углового распределения давления вблизи поверхности преобразователя.

## Study of Electric Fields of the Receiving Piezoceramic Converter with a Matching Layer

N.Y. Filipova, O.V. Korzhik

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Pobedy Ave., 03056 Kiev, Ukraine

The amplitude-frequency characteristics of electric fields in the form of a sensitivity related to external acoustic action of the piezoceramic cylindrical converter are obtained, which is located in a closed wave layer. At the same time, the scattering of a plane sound wave taking into account the reaction of the wave layer, the conditions of electroloading, the electric loading regime, and the electroelastic properties of the oscillating shell are taken into account. It is shown that the conditions of electric loading lead to changes in the acoustic transparency of the layer. It is established that the control of the parameters of the frequency response is possible by selecting the electrical load of the electronic circuit, which is connected directly to the electrodes of the electroelastic converter, by changing the thickness of the layer (which leads to a change in the wave dimensions of the oscillatory system) and the choice of technological materials.

**Keywords:** Piezoceramic transducer, Wave layer, Amplitude-frequency characteristics, Electric field, Electroelastic properties, Acoustic field, Sensitivity, Sound reception, Half-wave layer, Quarter-wave layer.

## Дослідження електричних полів прийомного п'єзокерамічного перетворювача з узгодженим шаром

Н.Ю. Філіпова, О.В. Коржик

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна

Отримано амплітудно-частотні характеристики чутливості приймального п'єзокерамічного циліндричного перетворювача (який розташований в замкнутому хвильовому шарі) з урахуванням реакції хвильового шару, умов електродування, режиму електричного навантаження і електропружних властивостей рухливої електропружної системи. Встановлено, що управління параметрами частотної характеристики можливе шляхом підбору електричного навантаження електронної схеми, зміною товщини шару і вибору матеріалу шару.

**Ключові слова:** П'єзокерамічний перетворювач, Хвильовий шар, Амплітудно-частотні характеристики, Електричне поле, Електропружні властивості, Акустичне поле, Чутливість, Прийом звуку, Напівхвильовий шар, Чвертьхвильовий шар.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. А.В. Коржик, Е.В. Попсуй, Н.Ю. Филиппова, *Электроника и связь* **17** No 6, 42 (2012) (A.V. Korzhik, Ye.V. Popsuy, N.Yu. Filippova, *Elektronika i svyaz'* **17** No 6, 42 (2012)) [In Russian].
2. V.T. Grinchenko, I.V. Vovk, V.T. Matsipura, *Acoustics wave problems: monography* (Kiev: Interservis, 2013).
3. J.L. Butler, C.H. Sherman, *Transducers as Hydrophones* (Switzerland: Springer International Publishing, 2016).
4. B.M. Abraham, M.J. Berliner, Directional Hydrophones in Towed Systems, Workshop on Directional Acoustic Sensors, Newport, RI, 17–18 April (2001).
5. Н.Ю. Филиппова, *Системи обробки інформації* **6** No 113, 146 (2013) (N.Yu. Fylyppova, *Systemy obrobky informatsiyi* **6** No 113, 146 (2013)) [In Russian].
6. Н.Ю. Филиппова, *Вестник Забайкальского государственного университета* **104** No 1, 74 (2014) (N.Yu. Filippova, *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* **104** No 1, 74 (2014)) [In Russian].
7. З.Т. Гусак, А.Г. Лейко, *J. Nano- Electron. Phys.* **8** No 1, 01029 (2016).
8. О.Н. Петрищев, Гармонические колебания пьезокерамических элементов Часть 1. Гармонические колебания пьезоэлектрических элементов в вакууме и метод резонанса-антирезонанса (Киев: "АВЕРС": 2012) (O.N. Petrishchev, *Garmonicheskiye kolebaniya p'yezokeramicheskikh elementov Chast' 1. Garmonicheskiye kolebaniya p'yezelektricheskikh elementov v vakuume i metod rezonansa-antirezonansa* (Kiev: "AVERS": 2012)).
9. A.V. Korzhik, O.N. Petrishchev, *Electron. Comm.* **19** No 6, 94 (2014).