

УДК 534.3

А.В. Коржик, канд. техн. наук.

## Об особенностях электромеханических преобразований в приемных пьезокерамических преобразователях с разрезными электродами

В рамках постановки стационарной задачи о приеме звука произвольной по конфигурации антенной решеткой, которая представлена в виде набора бесконечных по длине электроупругих круговых цилиндрических преобразователей, конкретизированы виды формирования электродов на поверхности преобразователей-оболочек. Приведены аналитические соотношения для определения электрических напряжений на нагрузках электродов и показаны соответствующие данному виду формирования электродов электромеханически активные моды колебаний оболочек.

In the frame of formulation stationary task about receiving of sound by array antenna with randomness configuration, which is presented by the set of infinitely longitude electro-resilient circle cylindrical converters, types of electrodes forming on the surfaces of shells-converters are specified. Analytical equations for defining electric voltages on the electrodes' loads are presented. Electromechanical active modes of shells oscillations, corresponded to certain type of electrodes forming, are also shown.

### Введение

Задача о приеме звуковых волн системами электроупругих преобразователей в виде сферических и цилиндрических оболочек рассмотрена в рамках стационарных постановок задач гидроэлектроупругости в основном для случаев полного электродирования поверхностей преобразователей – оболочек (например, работы [1-4]). Добавим также, что большинство работ, посвященных исследованию преобразователей с разрезными электродами, рассматривают лишь нестационарный режим возбуждения излучающих пьезокерамических преобразователей. Среди них упомянем работы ([5-7]). Кроме того, на сегодняшний день, в рамках традиционных подходов к описанию работы пьезокерамических цилиндрических преобразователей с помощью электромеханических аналогий, Б.С.Ароновым [8] предложен учет конфигурации электродов в виде угловых зависимостей коэффициента электромеханической трансформации. Такой подход, безусловно оправдан, од-

нако, не позволяет в полной мере учесть и использовать особенности связанности модовых составляющих колебаний приемных пьезокерамических преобразователей при оценке электрических напряжений на их нагрузках.

В связи с этим, целью работы является рассмотрение для стационарного режима работы наиболее распространенных видов электродирования поверхностей цилиндрических преобразователей и способов их учета в алгоритме сквозной задачи приема. При этом, определяются наборы электромеханически активных мод колебаний преобразователей и соответствующие им коэффициенты, позволяющие охарактеризовать степень «участия» некоторой моды в общем характере колебаний. Таким образом, в работе предлагается аналитический способ учета вида электродирования поверхности пьезокерамических преобразователей, который при решении задачи о приеме звука в сквозной постановке, позволит не только оценить модовую структуру колебаний, но и прогнозировать результаты возможных вариантов коммутации электродов преобразователя. Указанный способ учета вида электродирования позволит также применить полученные результаты в задачах о формировании пространственной избирательности цилиндрических преобразователей и антенных систем на их основе путем использования операций аддитивной обработки выходных сигналов преобразователей-оболочек при условии раздельного электрического нагружения их электродов.

### 1. Постановка задачи и основные соотношения

Для учета видов электродирования поверхностей преобразователей произвольной по форме антенной решетки привлечены геометрия и постановка задачи, приведенные в работах [9,10]. В соответствии с основными положениями указанных работ в части используемых моделей среды и преобразователей, а также по результатам работы [11], граничные условия задачи по электрическому полю для произвольного режима нагружения электродов  $s$ -х, преобразователей решетки могут быть использованы для отыскания электрических токов и напряжений в виде :

$$\int_s D_n^s dS = \int_s \frac{\partial D_n^s}{\partial t} dS = \frac{U_H^s}{Z_H^s} = I_n^s; \quad (1)$$

$$U_H^s = \int_{-\frac{h_{0s}}{2}}^{\frac{h_{0s}}{2}} E_{zs}^0 dh_{0s}; \quad (2)$$

$$D_n^s = \epsilon_{33}^T (1 - k_p^2) E_z^0 + \frac{d_{31}}{s_{11}^E (1 - \nu)} \frac{1}{r_{0s}} \left[ \frac{\partial U_s}{\partial \varphi_s} - W_s \right]; \quad (3)$$

где:

$E_z^0$  – напряженность электрического поля в материале оболочки;

$D_n^s$  – составляющая вектора электрической индукции;

$S$  – площадь поверхности электрода  $s$ -го преобразователя;

$\epsilon_{33}^T$  – диэлектрическая проницаемость материала оболочки;

$\nu$  – коэффициент Пуассона при постоянном механическом напряжении;

$k_p^2$  – квадрат планарного коэффициента связи;

$d_{31}$  – пьезомодуль;

$s_{11}^E$  – упругая податливость материала оболочки;

$r_{0s}$  – радиус  $s$ -ой оболочки;

$U_s, W_s$  – тангенциальная и нормальная составляющие перемещений точек поверхности оболочки, соответственно;

$h_{0s}$  – толщина  $s$ -ой оболочки;

$U_H^s$  – электрическое напряжение, развиваемое на нагрузке  $Z_H^s$  соответствующего электрода  $s$ -ой оболочки;

Выражения (1) – (3) записаны в предположении, что электрические нагрузки  $Z_H^s$  в общем случае комплексные и неодинаковые по характеру и величине. В дальнейшем, в случае, когда количество электродов  $s$  –го преобразователя больше одного, будем использовать следующее обозначение для пары верхних индексов нагрузок  $Z_H^{sm} - sm$ :

$$Z_H^{11}, Z_H^{12}, \dots, Z_H^{sm};$$

где 1-я цифра – обозначает номер преобразователя  $s$  ( $s = 1 \dots N$ );

2-я цифра – обозначает номер электрода  $m$  для  $s$  –го преобразователя.

Заметим также, что эти же обозначения будут справедливы для электрических напряжений на соответствующих нагрузках  $Z_H^s$ . Тогда, учет электродирования поверхности  $s$  –го преобразователя решетки в силу линейности задачи предлагается осуществить суперпозицией вида:

$$U_H^s = U_H^{s1} f(\varphi_s) + U_H^{s2} f_{s2}(\varphi_s) + \dots + U_H^{sm} f_{sm}(\varphi_s), \quad (4)$$

где:  $m$  изменяется от 0 до некоторого целого числа  $m = 1; 2; 3; \dots$  и, при этом, значение  $m = 0$  отвечает ситуации полного электродирования поверхности преобразователя;

$U_H^{sm}$  – электрическое напряжение, определяемое в результате решения сквозной задачи о приеме звука по значениям перемещений  $U_s, W_s$  (например [9;10;12]);

$\varphi_s$  – текущий угол в локальной системе координат  $s$ -го цилиндрического преобразователя;

$f_{sm}(\varphi_s)$  – функции включения соответствующего  $s, m$  –го электрода (то есть  $m$  –го электрода на  $s$ -ой оболочке - преобразователе);

Существует подход, использованный в работе [8], для которого угловая зависимость коэффициента трансформации  $n$  или напряженности электрического поля  $E_z(z, \varphi)$  представлена в виде:

$$n_i = \frac{d_{31} h_{0s}}{S_n^0} \Omega(z, \varphi) \text{ или } E_z(z, \varphi) = a_s \Omega(z, \varphi),$$

где –  $\Omega(z, \varphi)$  функция, вид которой зависит от конфигурации, способа электрического соединения электрода и толщины кругового цилиндрического преобразователя;

$i$  – форма (мода) колебания;

$a_s$  – некоторые коэффициенты.

Заметим, однако, что указанный подход, при малых толщинах кольца использующий выражение  $\Omega(z, \varphi) = \Omega(\varphi)$  и форму записи:

$$\Omega(-\varphi) = \Omega_i(\varphi) = (1 + i^2) \int_0^{2\pi} \Omega(\varphi) \cos(i\varphi) d\varphi,$$

отличается от универсальной функции ключа  $f_{sm}(\varphi_s)$ , предлагаемого в настоящей работе. Эта универсальность состоит в возможности учета условий электрического нагружения каждого электрода (как в отдельности, так и в сочетании с другими электродами), а также в использовании при решении указанной сквозной задачи условий сопряжения, вместо традиционных граничных условий. Подобная замена существенно приближает расчетную ситуацию к реальной и позволяет получить значения электрических напряжений на нагрузках электродов с учетом фактических угловых распределений давлений, колебательных скоростей и перемещений на поверхностях преобразователей в пределах соответствующих раскрытов.

Считая (как отмечено в [9]), функцию  $f_{sm}(\varphi_s)$  кусочно-непрерывной, полагаем, что ее зависимость от  $\varphi_s$ , определяет положение электрода на поверхности  $s$ -го преобразователя и величину углового раскрытия  $m$ -го электрода. В таком случае, функции вида единичного по амплитуде прямоугольного импульса:

$$f_{sm}(\varphi_s) = \text{rect}[B(\varphi_s)]_{B=1} = \text{rect}\left[\frac{\varphi_s}{2\gamma_{0s}}\right]_m$$

являются своеобразным ключом, принимающим значения «1» при  $\varphi_s \in [-\gamma_{0s}; \gamma_{0s}]$  и «0» – вне указанного интервала. Схемы расположения электродов на поверхности оболочки-преобразователя и соответствующие угловые распределения  $f_{sm}(\varphi_s)$  приведены на рис.1 – рис.4.

Таким образом, решая сквозную задачу приема для преобразователя с тем или иным видом электродирования (рис.1 – рис.4), необходимо совместно с условиями (1) – (3) использовать строго определенное число членов правой части выражения (4) и результаты угловых

представлений функций включений  $f_{sm}(\varphi_s)$  в зависимости от количества электродов и их раскрытов. Такими представлениями могут быть разложения  $f_{sm}(\varphi_s)$  в ряд Фурье по углу  $\varphi_s$ . Значит, поставленная задача, сводится к отысканию для заданного вида электродирования соответствующего представления функций включения  $f_{sm}(\varphi_s)$  разложений в виде рядов Фурье с последующей подстановкой в выражение (4). Полученное таким образом значение электрического напряжения  $U_H^s$  используется при решении сквозной задачи. При этом, результирующие значения  $U_H^s$  будут определены с учетом количества электродов и углов их раскрытия и дадут возможность отыскать неизвестные коэффициенты разложений для полей давления в рамках данной постановки с целью получения характеристик направленности (см. на пример [10]).

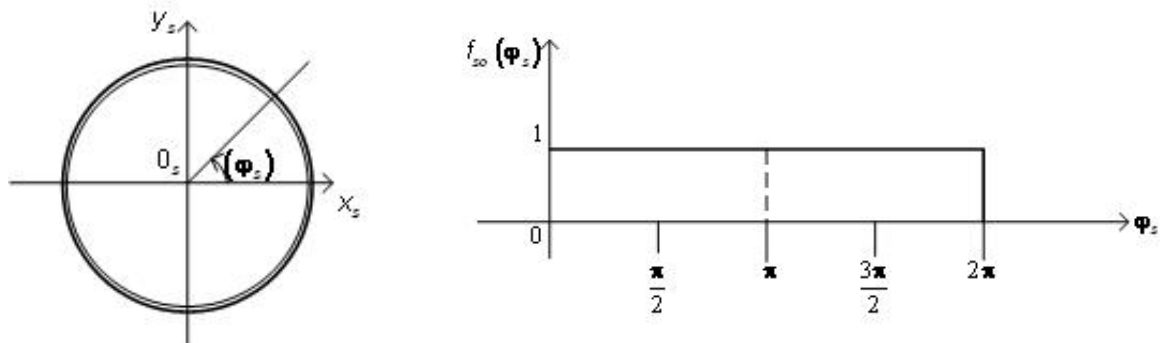


Рис.1. Сплошной электрод

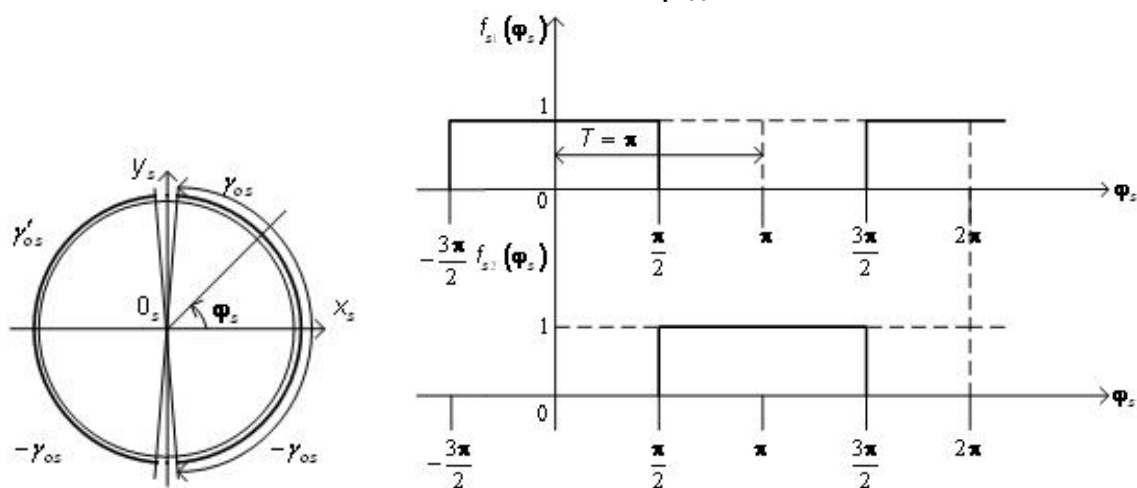


Рис.2. Пара разрезных электродов с раскрытом  $2|\gamma_{0s}| = 2|\gamma'_{0s}| = \pi$

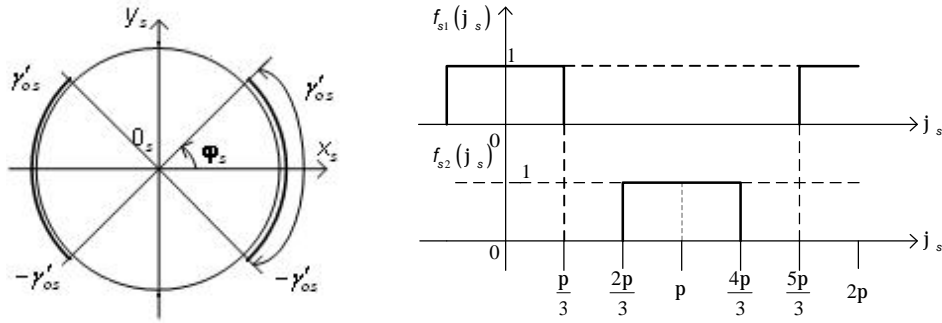


Рис.3. Пара разрезных электродов с раскрытием  $2|g_{0s}| = 2|g'_{0s}| = \frac{2p}{3}$

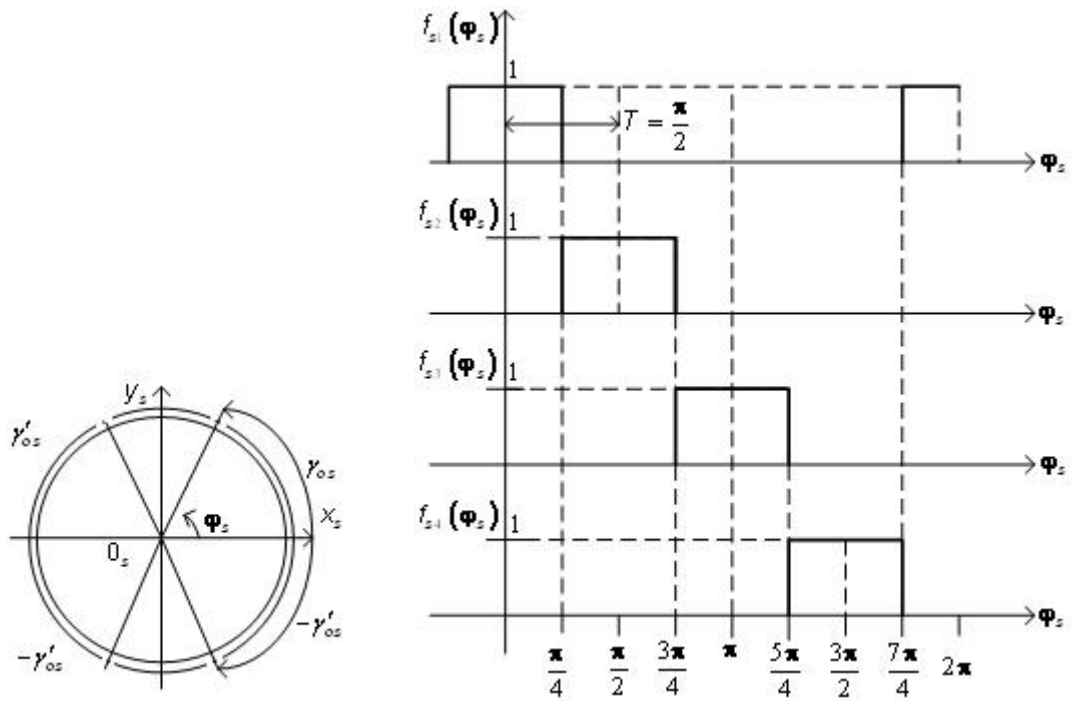


Рис.4. Четыре разрезных электрода с раскрытием  $2|g_{0s}| = 2|g'_{0s}| = \frac{p}{2}$

## 2. Решение задачи и основные результаты

Рассмотрим рис.1. Пусть прямоугольный импульс в виде функции  $f_{sm}(\varphi_s)$  задан на интервале  $\varphi_s \in [0; 2\pi]$  углами  $2|\gamma_{0s}| = 2|\gamma'_{0s}|$ . Тогда для раскрыва электрода  $360^\circ$ ,  $2|\gamma_{0s}| = 2|\gamma'_{0s}| = 2\pi$ :

$$f_{10}(\varphi_s) = \text{Brect} \left[ \frac{\varphi_s}{2\gamma_{0s}} \right]_{2|\gamma_{0s}|=2|\gamma'_{0s}|=\pi; B=1}. \quad (5)$$

Представляя  $f_{10}(\varphi_s)$  в виде ряда Фурье в комплексной форме, запишем:

$$f_{10}(\varphi_s) = \sum_k c_k e^{ik\varphi_s}, \quad -\infty < k < \infty,$$

$$\text{где } c_k = c_k^{10} = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} f_{10}(\varphi_s) e^{-ik\varphi_s} d\varphi_s \Big|_{\text{при } T=\pi} =$$

$$= \frac{1}{T} \frac{2\sin(k\gamma_{0s})}{k\gamma_{0s}} \gamma_{0s} \Big|_{\gamma_{0s}=\pi} = \frac{\sin k\pi}{k\pi}. \quad (6)$$

Таким образом, для случая полного электродривирования, функция включения (5) может быть записана в виде:

$$f_{10}(\varphi_s) = \sum_k \frac{\sin k\pi}{k\pi} e^{ik\varphi_s} = \sum_k \xi_k^{10} e^{ik\varphi_s}, \quad (7)$$

где коэффициенты

$$\xi_k^{10} = \begin{cases} 1, & k=0 \\ 0, & k=1,2,\dots \end{cases} \Rightarrow \xi_0^{10} = 1 = \beta_0^{10}. \quad (8)$$

Иными словами, соотношения (6) – (8) показывают, что при полном электродривировании электромеханически активной будет лишь нулевая ( $k=0$ ) мода колебаний преобразователя.

Остальные моды подавлены. Это соответствует классическим представлениям (например [8;13;14])

Меняя раскрыв электродов, очевидно, можно добиться подавления и высших форм колебаний. Так, для пары электродов с раскрывом по  $180^\circ$   $2|\gamma_{0s}| = 2|\gamma'_{0s}| = \pi$ , каждый (рис.2,) имеем две функции включения:

$$\begin{aligned} f_{11}(\varphi_s) &= \text{Brect} \left[ \frac{\varphi_s}{2|\gamma_{0s}|} \right]_{|B=1} \\ f_{12}(\varphi_s) &= \text{Brect} \left[ \frac{\varphi_s - \pi}{2|\gamma'_{0s}|} \right]_{|B=1} \end{aligned} \quad (8)$$

Поэтому, проведя разложение в ряд Фурье (8) функций включения (8), ограничиваясь функцией включения правого электрода, по аналогии с (6) получим:

$$f_{11}(\varphi_s) = \sum_k \frac{\sin k \frac{\pi}{2}}{k \frac{\pi}{2}} e^{ik\varphi_s} = \sum_k \xi_k^{11} e^{ik\varphi_s}, \quad (9)$$

$$\xi_k^{11} = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k = \pm 2; 4; 6 \dots; 2k \\ \beta_k^{11}, & k = \pm 1; 3; \dots; 2k + 1 \end{cases} \Rightarrow$$

где

$$\Rightarrow \begin{cases} \beta_0^{11} = 1; & \beta_{\pm 2}^{11} = 0; & \beta_{\pm 4}^{11} = 0; \\ \beta_{\pm 1}^{11} = \frac{2}{\pi}; & \beta_{\pm 3}^{11} = -\frac{2}{3\pi}; & \beta_{\pm 5}^{11} = \frac{2}{5\pi}; \dots \end{cases}$$

и получим:

$$f_{12}(\varphi_s) = \sum_k \frac{\sin k \frac{\pi}{2}}{k \frac{\pi}{2}} e^{ik\varphi_s} e^{-ik\pi} = \sum_k \xi_k^{12} e^{ik\varphi_s}; \quad (11)$$

$$\xi_k^{12} = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k = \pm 2; 4; 6 \dots; 2k \\ \beta_k^{12}, & k = \pm 1; 3; 5 \dots; 2k + 1 \end{cases} \Rightarrow$$

где

$$\Rightarrow \begin{cases} \beta_0^{12} = 1; & \beta_{\pm 2}^{12} = 0; & \beta_{\pm 4}^{12} = 0; \\ \beta_{\pm 1}^{12} = -\frac{2}{\pi}; & \beta_{\pm 3}^{12} = \frac{2}{3\pi}; & \beta_{\pm 5}^{12} = -\frac{2}{5\pi}; \dots \end{cases}$$

Соотношения (9) – (12) показывают отличия в расположении и модовой структуре электродов. Так, при электродировании в виде двух полуокружностей, каждый электрод определяет наличие нулевой и нечетных форм колебаний ( $k = 1; 3; 5; \dots$ ). Четные моды при этом исключаются.

При выбранном числе электродов  $m=2$ , уменьшив раскрывы каждого из них. Пусть

$2|\gamma_{0s}| = 2|\gamma'_{0s}| = \frac{2\pi}{3}$ ,  $T = \pi$  (рис.3). Для такого ти-

па электродирования имеем схожую с (8) форму записи для функций включения :

$$f_{11}(\varphi_s) = \text{Brect} \left[ \frac{\varphi_s}{2|\gamma_{0s}|} \right]_{|B=1} \quad \text{и}$$

$$f_{12}(\varphi_s) = \text{Brect} \left[ \frac{\varphi_s - \pi}{2|\gamma'_{0s}|} \right]_{|B=1},$$

но иные результаты разложения в ряд.

Так, при углах раскрыва электродов по  $120^\circ$  каждый, при  $k \in (-4; -3; -2; -1; 0; 1; 2; 3; 4)$  для правого электрода имеем:

$$f_{11}(\varphi_s) = \sum_k \frac{\sin(k \frac{\pi}{3})}{k \frac{\pi}{3}} \left( \frac{2}{3} \right) e^{ik\varphi_s} = \sum_k \xi_k^{11} e^{ik\varphi_s}; \quad (13)$$

$$\xi_k^{11} = \begin{cases} \frac{2}{3}, & k = 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{\pi}, & k = 1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2\pi}, & k = 2 \\ 0, & k = 3 \\ -\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}, & k = 4 \\ \dots \end{cases} \Rightarrow$$

где

$$\Rightarrow \begin{cases} \beta_0^{11} = \frac{2}{3}; & \beta_{\pm 2}^{11} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi}; & \beta_{\pm 4}^{11} = -\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}; \\ \beta_{\pm 1}^{11} = \frac{\sqrt{3}}{\pi}; & \beta_{\pm 3}^{11} = 0; \dots \end{cases}$$

а для противоположного (левого) электрода для первых пяти мод:

$$f_{12}(\varphi_s) = \sum_k \frac{\sin(k \frac{\pi}{3})}{k \frac{\pi}{3}} \left( \frac{2}{3} \right) e^{ik\varphi_s} e^{-ik\pi} = \sum_k \xi_k^{12} e^{ik\varphi_s}; \quad (15)$$

$$\xi_k^{12} = \begin{cases} \frac{2}{3}, & k = 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{\pi}, & k = 1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2\pi}, & k = 2 \\ 0, & k = 3 \\ -\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}, & k = 4 \\ \dots \end{cases} \Rightarrow$$

где

$$\Rightarrow \begin{cases} \beta_0^{12} = \frac{2}{3}; & \beta_{\pm 2}^{12} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi}; & \beta_{\pm 4}^{12} = -\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}; \\ \beta_{\pm 1}^{12} = -\frac{\sqrt{3}}{\pi}; & \beta_{\pm 3}^{12} = 0; \dots \end{cases}$$

Как видно из (13) – (16), подавленной в этом случае оказывается лишь мода с номером 3.

При этом, модовый состав колебаний обогащен за счет реализации четных мод.

Нанесение четырех электродов (рис.4) с раскрывами по  $90^\circ$  (рис.4,  $2|\gamma_{0s}| = 2|\gamma'_{0s}| = \frac{\pi}{2}$ ) с

периодом  $T = \frac{\pi}{2}$  показывает, что число функций включения увеличивается до четырех  $f_{11}(\varphi_s), f_{12}(\varphi_s), f_{13}(\varphi_s), f_{14}(\varphi_s)$ . При этом, для каждой функции включения для первых шести мод имеем:

$$f_{11}(\varphi_s) = \sum_k \frac{\sin(k \frac{\pi}{4})}{k \frac{\pi}{4}} e^{ik\varphi_s} e^{-ik\frac{\pi}{4}} = \sum_k \xi_k^{11} e^{ik\varphi_s}; \quad (17)$$

$$\xi_k^{11} = \begin{cases} 1, & k=0 \\ \frac{2\sqrt{2}}{\pi}, & k=1 \\ \frac{2}{\pi}, & k=2 \\ \frac{2\sqrt{2}}{3\pi}, & k=3 \\ 0, & k=4 \\ -\frac{2\sqrt{2}}{5\pi}, & k=5 \\ \dots \end{cases} \Rightarrow \quad (18)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \beta_0^{11} = 1; \beta_{\pm 1}^{11} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}; \beta_{\pm 3}^{11} = \frac{2\sqrt{2}}{3\pi}; \beta_{\pm 5}^{11} = -\frac{2\sqrt{2}}{5\pi}; \dots \\ \beta_{\pm 2}^{11} = \frac{2}{\pi}; \beta_{\pm 4}^{11} = 0; \end{cases}$$

далее, для ключей  $f_{12}(\varphi_s)$

$$f_{12}(\varphi_s) = \sum_k \frac{\sin(k \frac{\pi}{4})}{k \frac{\pi}{4}} e^{ik\varphi_s} e^{-ik\frac{\pi}{2}} = \sum_k \xi_k^{12} e^{ik\varphi_s}; \quad (19)$$

где

$$\xi_k^{12} = \begin{cases} 1, & k=0 \\ -i \frac{2\sqrt{2}}{\pi}, & k=1 \\ -\frac{2}{\pi}, & k=2 \\ i \frac{2\sqrt{2}}{3\pi}, & k=3 \\ 0, & k=4 \\ \frac{2\sqrt{2}}{5\pi}, & k=5 \\ \dots \end{cases} \Rightarrow \quad (20)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \beta_0^{12} = 1; \beta_{\pm 1}^{12} = \mp \frac{2\sqrt{2}}{\pi}; \beta_{\pm 3}^{12} = \pm i \frac{2\sqrt{2}}{3\pi}; \beta_{\pm 5}^{12} = \pm i \frac{2\sqrt{2}}{5\pi}; \dots \\ \beta_{\pm 2}^{12} = -\frac{2}{\pi}; \beta_{\pm 4}^{12} = 0; \end{cases}$$

и  $f_{13}(\varphi_s)$ ,  $f_{14}(\varphi_s)$  запишем соответственно:

$$f_{13}(\varphi_s) = \sum_k \frac{\sin(k \frac{\pi}{4})}{k \frac{\pi}{4}} e^{ik\varphi_s} e^{-ik\pi} = \sum_k \xi_k^{13} e^{ik\varphi_s}; \quad (21)$$

где

$$\xi_k^{13} = \begin{cases} 1, & k=0 \\ -\frac{2\sqrt{2}}{\pi}, & k=1 \\ \frac{2}{\pi}, & k=2 \\ -\frac{2\sqrt{2}}{3\pi}, & k=3 \\ 0, & k=4 \\ -\frac{2\sqrt{2}}{5\pi}, & k=5 \\ \dots \end{cases} \Rightarrow \quad (22)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \beta_0^{13} = 1; \beta_{\pm 1}^{13} = -\frac{2\sqrt{2}}{\pi}; \beta_{\pm 3}^{13} = -\frac{2\sqrt{2}}{3\pi}; \dots \\ \beta_{\pm 2}^{13} = \frac{2}{\pi}; \beta_{\pm 4}^{13} = 0; \end{cases}$$

$$\text{и } f_{14}(\varphi_s) = \sum_k \frac{\sin(k \frac{\pi}{4})}{k \frac{\pi}{4}} e^{ik\varphi_s} e^{ik\frac{\pi}{2}} = \sum_k \xi_k^{14} e^{ik\varphi_s}; \quad (23)$$

где

$$\xi_k^{14} = \begin{cases} 1, & k=0 \\ i \frac{2\sqrt{2}}{\pi}, & k=1 \\ -\frac{2}{\pi}, & k=2 \\ i \frac{2\sqrt{2}}{3\pi}, & k=3 \\ 0, & k=4 \\ -\frac{2\sqrt{2}}{5\pi}, & k=5 \\ \dots \end{cases} \Rightarrow \quad (24)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \beta_0^{14} = 1; \beta_{\pm 1}^{14} = \pm i \frac{2\sqrt{2}}{\pi}; \beta_{\pm 3}^{14} = \mp i \frac{2\sqrt{2}}{3\pi}; \dots \\ \beta_{\pm 2}^{14} = -\frac{2}{\pi}; \beta_{\pm 4}^{14} = 0; \end{cases}$$

Как, видно из соотношений (18)-(24), подавленной является мода 4, а геометрия размещения электродов иллюстрируется экспонен-

циальным сомножителем  $e^{\pm ik\frac{\pi}{2}}$  для электродов 1-2 и 1-4 относительно выбранной ориентации электродов 1-1 и 1-3. При этом результаты разложений показывают, что рассмотренные виды электродирования обеспечивают свои особенные наборы модовых составляющих,

обогащая или обедняя ими колебательную систему. Различие в коэффициентах, членах рядов разложений полей по амплитуде и фазе, очевидно, позволяет прогнозировать степень использования той или иной формы колебаний в формировании обобщающего (суммарного) сигнала на нагрузке электрода.

Отметим также, что данный подход позволяет наглядно проводить аддитивные операции с результирующими сигналами, ориентируясь на коэффициенты разложений (7) – (24) и на необходимость подавления или же наоборот усиления той или иной моды, либо их совокупности.

### Выводы

Таким образом, в работе предложен аналитический способ учета раскрытия, ориентации и количества электродов, нанесенных на поверхность кругового цилиндрического преобразователя, которые определяют характер возбуждения в нем электромеханически активных мод при решении сквозной задачи о приеме звуковых волн. При этом показало, что:

- изменение угловых размеров электродов позволяет изменять модовый состав колебательной системы – от реализации лишь нулевой моды до подавления отдельных мод высших порядков;

- использование нескольких мод, вклады которых в суммарный сигнал на независимой электрической нагрузке определяются с использованием полученных коэффициентов разложений, требует своеобразной оптимизации расположения и угловых размеров электродов.

На основе постановки и решения сквозной задачи приема показаны перспективы применения указанного способа, которые состоят в возможности изучения частотных зависимостей амплитудно-фазовых характеристик модовых составляющих и их комбинаций, а также в выборе характера коммутации электродов при внесении амплитудно-фазовых распределений с целью определения пространственных характеристик.

### Литература

1. Гринченко В.Т., Лейко А.Г. Излучение звука системами взаимодействующих пьезокерамических оболочек // Дока. 4 Всесоюз. симп. по физике акустогидродинамических явлений и оптоакустики/ Ашхабад, 1985.- Ашхабад:1985.- С. 83-87.
2. Дідковський В.С. Лейко А.Г. Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі. - Кіровоград: Імекс-ЛТД, 2006.-448 с.

3. Савин В.Г. Преобразование акустических импульсов в электрические сферической пьезокерамической оболочкой // Электроника и связь.-2006.-№6.-С.36-42.
4. Моргунов И.О. Действие плоской нестационарной волны давления на сферический пьезокерамический преобразователь с внутренним экраном // Электроника и связь.-2007.-№1.- С.62-69.
5. Моргунов И.О. Излучение акустических импульсов сферическим тонкостенным преобразователем с разрезными электродами // Электроника и связь.-2007.-№3.-С.43-49
6. Кубенко В.Д., Бабаев А.Э. Влияние кабельного тракта на работу цилиндрического пьезоизлучателя в нестационарных режимах // Прикл. механика-1997.-№11.- С.46-62.
7. Бабаев А.А. Нестационарные режимы работы многомодового цилиндрического излучателя с учетом процессов в кабельном тракте // Прикл. механика.1999. -Т.35.-№8.- С.35-4В.
8. Аронов Б.С. Электро-механические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. -Л.:Энергоатомиздат,1990.-271 с.
9. 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.
10. Коржик О.В., Лейко О.Г. Формування характеристик напрямленості одиночного приймального електропружного циліндричного перетворювача з розрізними електродами // Наукові вісті НТУУ «КПІ».-2005.-№1.- С.50-55.
11. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций: В 5т. -К.:Наукова думка,1989.-280 с.
12. Коржик А.В. Лейко А.Г. Формирование характеристик направленности антенны, состоящей из двух электроупругих элементов //Электроника и связь.-2009.-№1.- С.45-53.
13. Проводные электроакустические преобразователи (Расчет и проектирование): Справочник/ В.В. Богородский, Л.А. Зубарев, Е.А. Корепин, В.И. Якушев. -Л.: Судостроение,1983.-248 с.
14. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика: учеб. пособие.-2е изд., перераб и доп.-Л.: Судостроение, 1990. -320 с.
15. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики, - Л.: Судостроение, 1972. -352 с.