

УДК534.3

Ю.Я. Меленко

Об одном подходе к построению круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей.

Рассмотрен один из возможных подходов к построению круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей, состоящий в заполнении их внутренней полости жидкостью и коаксиально расположенным цилиндром с абсолютно жесткими акустическими свойствами. Исследованы характеристики таких преобразователей.

Was considered one of possible approach to design circular cylindrical ceramic transducers, that consist in water filling of their cavity and coaxial cylinder with absolutely with rigid acoustic properties.

Ключевые слова: преобразователь пьезо-керамический, экран акустический жесткий, полость внутренняя водозаполненная.

Введение

В гидроакустических устройствах различного назначения широкое применение [1, 2] нашли круговые цилиндрические пьезокерамические преобразователи. Особенность их традиционного построения состоит в том, что размеры поперечного сечения жестко связаны с резонансной частотой нулевой моды колебаний. Это приводит к тому, что при разработке гидроакустических средств с новыми рабочими частотами приходится заново создавать новые цилиндрические преобразователи, проходя последовательно все этапы их проектирования и отработки. С целью исключения этого недостатка были предложены иные пути построения таких преобразователей, часть из которых описана в работе [2, 3]. Физическая суть их всех состоит в изменении реактивной нагрузки преобразователей, в том числе и за счет использования звукового поля во внутренней полости преобразователей.

Целью данной статьи является исследование одного из таких новых путей построения круговых цилиндрических преобразователей. Его суть состоит в наполнении внутренней полости преобразователя жидкостью и размещении в ней коаксиально с пьезокерамическим цилиндром абсолютно жесткого акустического экрана.

Вывод аналитических соотношений

Схема сечений кругового цилиндрического преобразователя, построенного по предложенному пути, представлена на рис.1. Преобразователь состоит из круговой цилиндрической пьезокерамической оболочки 1 внешним радиусом r_0 и толщиной δ , заполненной жидкостью кольцевой полости 2 и кругового цилиндрического акустического экрана 3 жесткого типа радиусом r_2 , расположенного коаксиально с пьезокерамической оболочкой. Полагаем, что внешнее пространство II и кольцевая область I заполнены жидкостями с параметрами ρ_2 и $\rho_1 c_1$ соответственно. Пьезокерамическая оболочка поляризована радиально, электроды нанесены на внешнюю и внутреннюю боковые поверхности оболочки, а толщина оболочки мала по сравнению с ее радиусом ($\delta \ll r_0$). На пьезокерамическую оболочку подается возбуждающее электрическое напряжение U . При длине преобразователя, большей $5\div 7$ его диаметров, преобразователь можно рассматривать как бесконечный.

Рассмотрим звуковое поле в кольцевой полости (область I) и в окружающей среде (область II) и резонансные свойства в целом. Из структуры излучателя следует, что осевая составляющая колебательной скорости в областях I и II равна нулю. Обмен звуковой энергией между указанными областями осуществляется через пьезокерамическое кольцо. Запишем граничные условия в следующем виде:

$$\frac{(\partial\Phi_2)}{\partial r} = 0; \quad r \geq r_0;$$

$$\frac{(\partial\Phi_1)}{\partial r} = 0; \quad r_2 \leq r \leq r_1;$$

$$\frac{(\partial\Phi_1)}{\partial r} = 0; \quad r = r_2.$$

Учитывая принятые допущения, потенциал скоростей в областях I и II представим в следующем виде:

$$\Phi_1 = A_0 J_0(k_1 r) + B_0 N_0(k_1 r);$$

$$\Phi_2 = C_0 H_0^{(1)}(kr).$$

где A_0 , B_0 и C_0 - неизвестные коэффициенты; $J_0(k_1 r)$, $N_0(k_1 r)$ и $H_0^{(1)}(kr)$ - функции Бесселя, Неймана и Ханкеля; k и k_1 - волновые числа сред.

Тогда давления p_1 , p_2 и колебательные скорости v_1 , v_2 в этих областях можно записать выражениями:

$$\begin{aligned} p_1 &= -j\omega_1 \rho_1 [A_0 J_0(k_1 r) + B_0 N_0(k_1 r)]; \\ p_2 &= -j\omega \rho C_0 H_0^{(1)}(kr); \\ v_1 &= k_1 [A_0 J_1(k_1 r) + B_0 N_1(k_1 r)]; \\ v_2 &= k C_0 H_1^{(1)}(kr); \end{aligned} \quad (1)$$

Неизвестные коэффициенты A_0 , B_0 и C_0 в выражениях (1) определим из условий

$$P_2 \Big|_{r=r_0} - P_1 \Big|_{r=r_1} + v_0 Z_{об} = n_m U;$$

$$v_1 \Big|_{r=r_1} = v_2 \Big|_{r=r_0} = v_0; \quad (2)$$

$$v_1 \Big|_{r=r_2} = 0,$$

где $Z_{об}$ - импеданс пьезокерамической оболочки; n_m - коэффициент электромеханической трансформации оболочки.

После соответствующих подстановок из (1) условия (2) принимают вид, удобный для определения неизвестных A_0 , B_0 и C_0 :

$$-j\omega \rho C_0 H_0^{(1)}(kr_0) + j\omega \rho_1 [A_0 J_0(k_1 r_1) + B_0 N_0(k_1 r_1)] + v_0 Z_{об} = n_m U;$$

$$k_1 [A_0 J_1(k_1 r_1) + B_0 N_1(k_1 r_1)] = k C_0 H_1^{(1)}(kr_0); \quad (3)$$

$$k_1 [A_0 J_1(k_1 r_2) + B_0 N_1(k_1 r_2)] = 0.$$

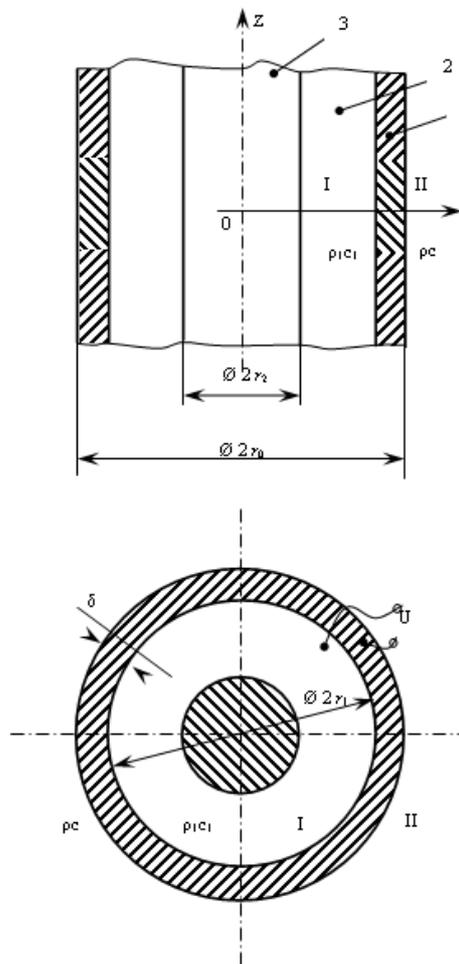


Рис.1.

Определив из (3) неизвестные A_0 , B_0 и C_0 , колебательных скоростей в областях I и II в виде: можем записать выражения для давлений и ко-

$$p_1 = -j\rho_1 c_1 \frac{n_T U}{\left[-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + Z_{об} \right]} \cdot \frac{J_1(k_1 r) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)};$$

$$p_2 = -j\rho c \frac{n_T U}{\left[-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + Z_{об} \right]} \cdot \frac{H_0^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)}; \quad (4)$$

$$v_1 = -j\rho_1 c_1 \frac{n_T U}{\left[-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + Z_{об} \right]} \cdot \frac{J_1(k_1 r) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)};$$

$$v_2 = -j\rho c \frac{n_T U}{\left[-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + Z_{об} \right]} \cdot \frac{H_0^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)}.$$

В выражениях (4) в знаменателе первый множитель в квадратных скобках представляет локальный механический импеданс Z_M преобразователя, состоящий из импеданса излучения

пульсирующего цилиндра Z_2 , импеданса излучения в кольцевую полость Z_1 и импеданса оболочки $Z_{об}$. Выражения (4) можно представить в более компактном виде

$$p_1 = -j\rho_1 c_1 \frac{n_T U}{\left[-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + Z_{об} \right]} \cdot \frac{J_1(k_1 r) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} =$$

$$= -j\rho_1 c_1 \frac{n_T U}{Z_M} \cdot \frac{J_0(k_1 r) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)};$$

$$v_1 = -j\rho_1 c_1 \frac{n_T U}{Z_M} \cdot \frac{J_1(k_1 r) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)};$$

$$p_2 = -j\rho c \frac{n_T U}{Z_M} \cdot \frac{H_0^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)}; \quad v_2 = -j\rho c \frac{n_T U}{Z_M} \cdot \frac{H_1^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)}.$$

Колебательная скорость оболочки (кольца)

$$v_0 = \frac{n_T U}{Z_M}$$

Здесь $Z_M = Z_2 + Z_1 + Z_{об}$;

$$Z_1 = j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)};$$

$$Z_2 = -j\rho_1 c_1 \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)}.$$

Анализ результатов расчетов

С использованием выражений (3) и (5) были выполнены расчеты акустических параметров преобразователей, построенных по предложенной схеме. Результаты расчетов представлены на рис.2 и рис. 3.

Проанализируем зависимости импеданса излучения Z_1 в кольцевую область от волнового размера внутренней поверхности пьезокерамической оболочки и размера кольцевой области (рис. 2).

Как следует из приведенных кривых, наличие жесткого экрана сдвигает точку перехода импеданса через нуль (резонанс кольцевой полости) вправо по шкале частот от $k_1 r_1 = 2,405$. В области собственных резонансов нулевой моды

радиальных колебаний пьезокерамических оболочек импеданс Z_1 имеет упругий характер, способствующий росту резонансной частоты механических колебаний всей системы. Такой характер импеданса Z_1 , очевидно, объясняется тем, что на относительно низких частотах изменение объема между жестким стержнем – экраном и колеблющейся оболочкой происходит только за счет сжатия жидкости.

Для получения количественных данных об изменениях резонансной частоты были выполнены расчеты преобразователя, построенного на базе пьезокерамических колец состава ЦТБС-3 и состава ТБК-3. Обобщенные результаты приведены в виде графиков на рис. 3, характеризующих зависимость резонансной частоты излучателя ω_p от радиуса жесткого экрана r_2 . Данные представлены в виде относительных

величин $\frac{\omega_p}{\omega_0}$ и $\frac{r_2}{r_1}$, где ω_0 - резонансная частота

пьезокерамического кольца в воздухе. Кривые 1 и 2 соответствуют составам ЦТБС-3 и ТБК-3. Звездочками обозначены результаты эксперимента, полученные на макете из пьезокерами-

ческих колец состава ЦТБС-3 со стальными экранами-стержнями радиусом $\frac{r_2}{r_1} = 0,5; 0,7; 0,85$

при заполнении кольцевой полости водой. Из приведенных результатов видно, что наличие жесткого экрана в полости излучателя существенно влияет на частоту резонанса, увеличивая ее в несколько раз. Наиболее эффективное повышение резонансной частоты происходит при величине $\frac{r_2}{r_1} > 0,5$. Однако следует заметить, что

малые величины кольцевого зазора между экраном и кольцом (при $\frac{r_2}{r_1} > 0,85$) на практике ис-

пользовать нецелесообразно из-за резкого изменения (неустойчивости) резонансной частоты. Незначительное изменение величины зазора приводит к существенному изменению частоты резонанса.

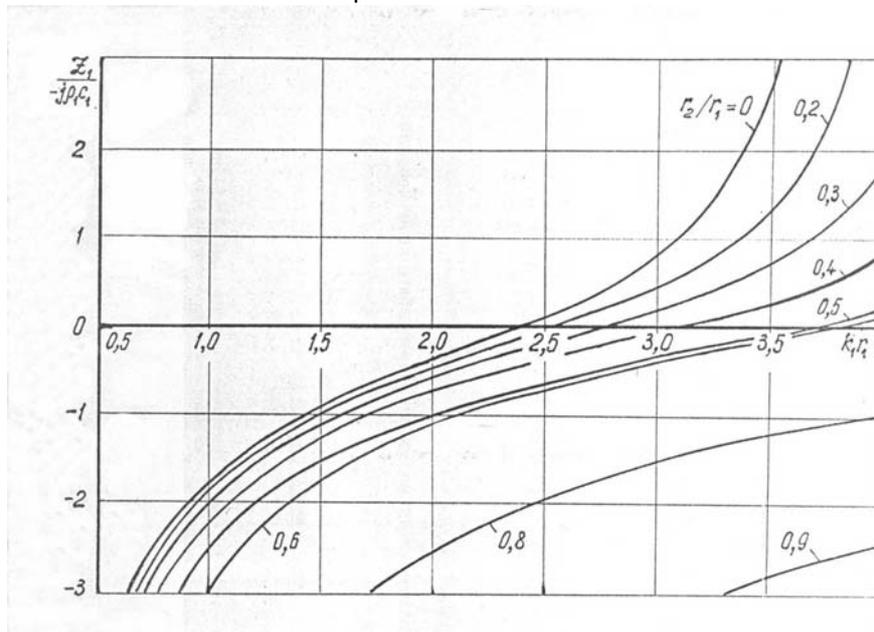


Рис.2.

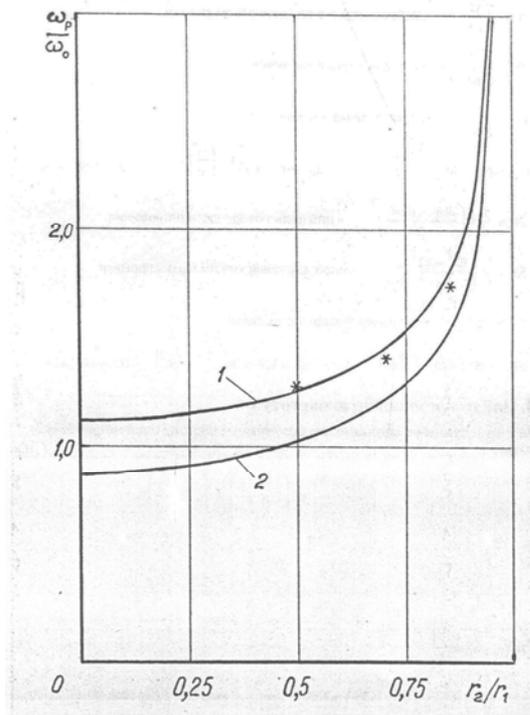


Рис.3.

Выводы

Использование соосного жесткого цилиндрического экрана в цилиндрических преобразователях может быть рекомендовано как метод повышения резонансной частоты таких излучателей без изменений наружных габаритов и структуры механической колебательной системы в виде пьезокерамического кольца. Рекомендуемым методом целесообразно повышать частоту резонанса до двух раз. При этом величина отношения $\frac{r_2}{r_1}$ не

превысит 0,85, а незначительные отклонения от этой величины еще не приведут к существенному изменению частоты резонанса излучателя.

Государственное предприятие
«Киевский НИИ гидроприборов»

Предлагаемый метод может быть успешно использован в следующих случаях. Волновые (резонансные) размеры диаметра преобразователя не ограничиваются и требуется увеличить мощность излучения при сохранении предельной величины удельной мощности излучения. Метод позволяет осуществить это путем увеличения диаметра излучателя (увеличения поверхности излучения) с одновременным повышением частоты резонанса до требуемой, установив в полости с жидкостью соосно жесткий экран в виде стержня необходимого диаметра. Иногда требуется увеличить диаметр преобразователя при сохранении резонансной частоты с целью получения требуемого объема в полости для размещения электронной аппаратуры, например, в авиационных гидроакустических средствах. Осуществить требование возможно путем размещения в полости преобразователя увеличенного диаметра жесткой трубы, используемой для аппаратного отсека, с одновременным сохранением резонансной частоты преобразователя в целом.

Литература.

1. Подводные электроакустические преобразователи/ Под редакцией В.В. Богородского. – Л.: Судостроение, 1983.- 248с.
2. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). – Кіровоград: «Імекс-ЛТД», 2006.-448с.
3. Гринченко В.Г., Вовк И. В. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – Киев: Наук. думка, 1986. – 240с.

Поступила в редакцию 10 октября 2012 г.