

## Акустические приборы и системы

УДК534.3

### Об одном из путей управления резонансной частотой круговых цилиндрических преобразователей

Ю.Я. Меленко

ГП «Киевский НИИ Гидроприборов»,  
ул. Сурикова 3, г. Київ, 03035, Украина.

**Исследован один из возможных путей управления резонансной частотой кругового цилиндрического пьезокерамического преобразователя, состоящий в образовании с использованием соосного акустически мягкого цилиндрического экрана во внутренней полости преобразователя кольцевого зазора, заполненного жидкостью, и управлении размерами этого зазора. Библ. 1, рис. 3.**

**Ключевые слова:** преобразователь пьезокерамический, экран акустический мягкий, зазор внутриволновой водозаполненный.

#### Введение

Проблема управления резонансной частотой гидроакустических преобразователей относится к одной из наиболее актуальных, особенно если это управление осуществляется без изменения геометрических размеров и структуры построения его пьезокерамической части. Управление резонансными частотами позволяет унифицировать преобразователи и тем самым сократить их номенклатуру, сроки проектирования и изготовления. Если же при этом удастся еще и сместить резонансную частоту в область низких частот, то это обеспечивает уменьшение волновых размеров преобразователей и тем самым нахождение рациональных технических решений по построению низкочастотных электроакустических антенн [1].

Целью данной статьи является исследование одного из таких путей управления резонансной частотой цилиндрического пьезокерамического преобразователя. Суть этого управ

ления состоит в создании звукового поля во внутренней полости цилиндрического преобразователя и управлении реактивной нагрузкой преобразователя в нужном направлении путем образования между внутренней поверхностью пьезокерамического цилиндра и внешней поверхностью соосного акустически мягкого экрана, заполненной жидкостью кольцевой полости заданных размеров.

#### Вывод аналитических соотношений

Исследуем круговой цилиндрический излучающий звук преобразователь, схема построения которого представлена на рис.1. Преобразователь состоит из круговой цилиндрической пьезокерамической оболочки 1 внешним радиусом  $r_0$  и толщиной  $\delta$ , заполненной жидкостью кольцевой полости 2 и кругового цилиндрического акустического экрана 3 мягкого типа радиусом  $r_2$ , расположенного коаксиально с пьезокерамической оболочкой. Полагаем, что внешнее пространство II и кольцевая область I заполнены жидкостями с параметрами  $\rho c$  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 5–7 его диаметров, преобразователь можно рассматривать как бесконечный.

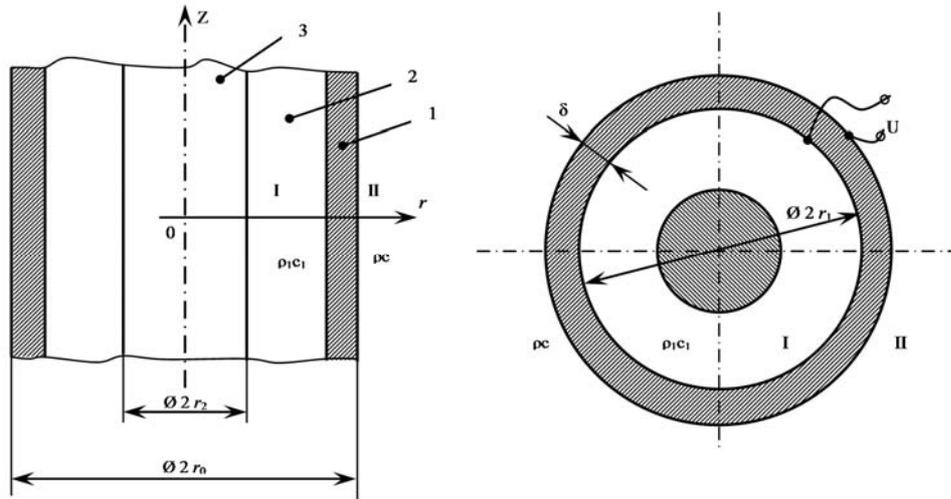


Рис. 1. Рассмотрим звуковое поле в областях I и II излучателя

Учитывая принятые допущения, потенциал скоростей в этих областях представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= A_0 J_0(k_1 r) + B_0 N_0(k_1 r), \\ \Phi_2 &= C_0 H_0^{(1)}(kr). \end{aligned} \quad (1)$$

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:

$$\begin{aligned} p_1 &= -j\omega\rho_1[A_0 J_0(k_1 r) + B_0 N_0(k_1 r)] \\ p_2 &= -j\omega\rho C_0 H_0^{(1)}(kr); \\ v_1 &= k_1(A_0 J_1(k_1 r) + B_0 N_1(k_1 r)); \\ v_2 &= k C_0 H_1^{(1)}(kr); \end{aligned} \quad (2)$$

Неизвестные коэффициенты  $A_0$ ,  $B_0$  и  $C_0$  в выражениях (2) определим из условий

$$\begin{aligned} P_2|_{r=r_0} - P_1|_{r=r_1} + v_0 z_{об} &= n_m U; \\ v_1|_{r=r_1} = v_2|_{r=r_0} &= v_0; \\ P_1|_{r=r_2} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

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

После соответствующих подстановок условия (3) принимают вид, удобный для определения неизвестных коэффициентов  $A_0$ ,  $B_0$  и  $C_0$ , а также колебательной скорости  $v_0$ :

$$\begin{aligned} -j\omega\rho C_0 H_0^{(1)}(kr_0) + j\omega\rho_1[A_0 J_0(k_1 r_1) + \\ + B_0 N_0(k_1 r_1)] + v_0 z_{об} &= n_m U; \\ -j\omega\rho_1[A_0 J_0(k_1 r_2) + B_0 N_0(k_1 r_2)] &= 0 \\ k_1 [A_0 J_1(k_1 r_1) + B_0 N_1(k_1 r_1)] &= v_0; \\ k C_0 H_1^{(1)}(kr_0) &= v_0; \end{aligned} \quad (4)$$

Определив из (4) неизвестные коэффициенты  $A_0$ ,  $B_0$  и  $C_0$ , запишем полные выражения для звуковых давлений и колебательных скоростей в областях I и II:

$$\begin{aligned} p_1 &= -j\rho_1 c_1 \cdot \frac{n_m U}{-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1)N_1(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2)N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1)N_1(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2)N_1(k_1 r_1)} + z_{об}} \cdot \frac{J_0(k_1 r)N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2)N_0(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1)N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2)N_1(k_1 r_1)}; \\ p_2 &= -j\rho c \cdot \frac{n_m U}{-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1)N_1(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2)N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1)N_1(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2)N_1(k_1 r_1)} + z_{об}} \cdot \frac{H_0^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)}; \end{aligned}$$

$$v_1 = \frac{n_m U}{-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + z_{об}} \cdot \frac{J_1(k_1 r) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_1(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)}$$

$$v_2 = \frac{n_m U}{-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + z_{об}} \cdot \frac{H_0^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)}$$

Тогда колебательную скорость оболочки можно представить в виде:

$$v_0 = \frac{n_m U}{-j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + z_{об}}$$

Рассмотрим комплексный импеданс излучения пьезокерамического кольца в кольцевую полость. По определению [1] импеданс равен

$$z_1 = -\frac{P_1}{v_1} \Big|_{r=r_1} = j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} \quad (6)$$

Здесь знак «-» появляется в связи с тем, что положительное звуковое давление на внутренней поверхности пьезокерамического кольца (сжатие) приводит к появлению колебательной скорости, направленной внутрь излучателя.

Обратим внимание на знаменатель в выражениях (5). Здесь первый сомножитель в квадратных скобках представляет сумму импедансов: импеданса излучения во внешнее пространство (область II)  $z_2$ , импеданса излучения в кольцевую полость (область I)  $z_1$  и импеданса  $z_{об}$ . Назовем суммарный импеданс механическим импедансом акустико-механической колебательной системы и обозначим его

$$z_M = z_2 + z_1 + z_{об}.$$

Учитывая принятое обозначение, выражения (5) и колебательную скорость пьезокерамического кольца  $v_0$  можно записать в более компактном виде:

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

$$\rho_2 = -j\rho c \frac{n_m U}{z_M} \frac{H_0^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)}$$

$$v_1 = \frac{n_m U}{z_M} \cdot \frac{J_1(k_1 r) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_1(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{n_m U}{z_M} \cdot \frac{H_0^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)}; \quad v_0 = \frac{n_m U}{z_M}.$$

### Анализ результатов расчетов

С использованием выражений (4) и (7) были выполнены расчеты акустических параметров преобразователей рассмотренного типа. Результаты расчетов представлены на рис.2 и 3.

Проанализируем полученные данные.

Из выражений (5) и (7) видно, что импеданс  $z_1$  влияет на импеданс всей системы  $z_M$  и, соответственно, на параметры системы, например, определяемые выражениями (7), и на резонансную частоту, определяемую равенством  $\text{Im} z_M = 0$ . На рис.2 приведена частотная зависимость импеданса  $z_1$  для различных отношений  $r_2 / r_1$ . В общем можно сказать, что: а) характер импеданса – чисто реактивный; б) имеется бесконечная последовательность резонансов и антирезонансов жидкости в кольцевой полости. При малых значениях  $k_1 r_1$  импеданс имеет инерционный характер, который сохраняется до тех пор, пока волновой размер кольцевой полости  $(r_1 - r_2) / \lambda$  не станет близок к значениям, приведенным на рис.3 (кривая 1). При указанных размерах полости цилиндрическая волна давления, излучаемая каждым элементарным участком внутренней поверхности пьезокерамической оболочки  $r = r_1$ , достигает поверхности акустически мягкого стержня  $r = r_2$ , отражается от нее, изменив фазу на  $\pi$ , и возвращается к излучающему ее участку, имея уже фазу, отличающуюся на  $2\pi$  от фазы волны давления, излучаемой в этот момент этим участком. В результате суммарное давление на поверхности  $r = r_1$  резко увеличивается. Волна колебательной скорости отражается от мягкого стержня без изменения фазы и достигает излучившего ее участка, имея фазу, отличающуюся только на  $\pi$ . В результате суммарная колебательная скорость на поверхности  $r = r_1$  становится равной нулю. При этом  $z_1 = \infty$ , наступает

резонанс колебательных скоростей или параллельный резонанс (его еще можно назвать антирезонансом). С увеличением отношения  $r_2/r_1$  (или уменьшением кольцевого слоя жидкости) положение импеданса  $z_1 = \infty$  начинает приближаться к случаю плоского слоя, когда импеданс  $z_1 = \infty$  наблюдается при волновой толщине слоя, равной  $(r_1 - r_2)/\lambda = 0,25$ . После антирезонанса импеданс  $z_1$  меняет знак и имеет уже упругий характер, сохраняющийся до тех пор, пока волновой размер кольцевого слоя  $(r_1 - r_2)/\lambda$  не станет близок к значениям, приведенным на рис.3 (кривая 2). Отраженная от стержня цилиндрическая волна давления достигает поверхности  $r = r_1$ , имея уже фазу, отличающуюся на  $3\pi$  от фазы волны, излучаемой в этот момент поверхностью  $r = r_1$ . В результате суммарное давление на излучаемой поверхности  $r = r_1$  становится равным нулю и, как следствие, импеданс  $z_1 = 0$ .

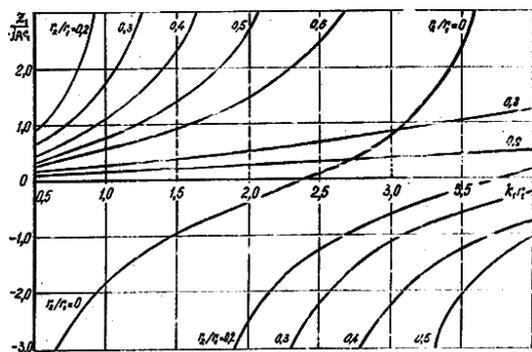


Рис. 2.

Это явление можно интерпретировать как резонанс давлений (или последовательный резонанс). После резонанса  $z_1$  меняет знак и имеет снова инерционный характер. Далее картина повторяется – антирезонансы чередуются с резонансами, чем подтверждается теорема Форстера. С увеличением отношения  $r_2/r_1$  положение импеданса  $z_1 = 0$  начинает приближаться к случаю плоского слоя, когда  $z = 0$  при  $(r_1 - r_2)/\lambda = 0,5$ . Точку  $k_1 r_1 = 0$  можно считать резонансом давлений. Существует два предельных случая: первый  $r_2/r_1 = 1,0$ ; второй  $r_2/r_1 = 0$ . В первом случае в полости оболочки

жидкость отсутствует,  $z_1 = 0$ . Во втором – в полости акустически мягкий стержень отсутствует.

Таким образом, изменяя отношение  $r_2/r_1$  можно управлять импедансом  $z_1$  и, соответственно, параметрами всей акустико-механической колебательной системы. В интересующем нас диапазоне частот (диапазон резонансов радиальных колебаний пьезокерамических колец на нулевой моде) импеданс  $z_1$  имеет как инерционный, так и упругий характер. Поэтому первоначально эффект выражается в снижении резонансной частоты излучателя в целом. Указанный эффект имеет следующее физическое объяснение. Изменение объема кольцевой полости на относительно низких частотах происходит за счет перемещения кольцевого слоя жидкости.

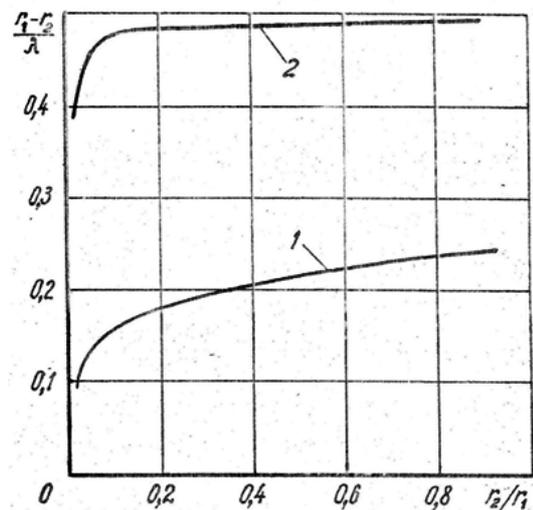


Рис. 3.

Реакция жидкости на движение внутренней поверхности кольца (оболочки) имеет чисто инерционный (массовый) характер. К массе пьезокерамического кольца и присоединенной массе жидкости снаружи добавляется присоединенная масса жидкости в кольцевой полости. Суммарная масса колебательной системы увеличивается. Следовательно, ее резонансная частота снижается и сдвигается влево по шкале частот по отношению к резонансной частоте пьезокерамической оболочки (кольца) в вакууме. Полученный эффект может служить методом снижения резонансной частоты цилиндрического излучателя. На частотах ниже антирезонанса кольцевого слоя жидкости к упругости пьезокерамического кольца добавляется упругость кольцевого слоя жидкости. Суммарная уп-

ругость акустико-механической колебательной системы увеличивается. В результате появляется резонанс систем, частота которого находится выше резонансной частоты пьезокерамического кольца (оболочки). Таким образом, у исследуемой колебательной системы имеются резонансы, частоты которых находятся вблизи резонанса пьезокерамического кольца в вакууме и расположены на шкале частот ниже и выше частоты резонанса кольца (оболочки).

### Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод. Применение акустически мягкого стержня в полости пьезокерамической оболочки является методом управления таким важным параметром излучателя как резонанс-

ная частота. Метод позволяет получить резонансы, расположенные как ниже, так и выше резонанса оболочки. Положение резонансов на шкале частот может управляться изменение величины радиуса акустически мягкого стержня.

Обеспечение многорезонансности электроакустических преобразователей имеет важное практическое значение. Например, в гидроакустике оно позволяет гидролокационной станции, имея единую гидроакустическую антенну, работать на нескольких существенно различающихся эталонах частот.

### Литература

1. Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. Подводные акустические антенны. Киев, 2000. – 320 с.

УДК 534.3

## Один з шляхів регулювання резонансною частотою кругових циліндричних перетворювачів.

Ю.Я. Меленко

ДП «Київський НДІ Гідроприладів»,  
вул. Сурикова 3, м. Київ, 03035, Україна.

Досліджені акустичні характеристики циліндричного перетворювача, утвореного з п'єзокерамічної оболонки та співвісного з нею циліндричного акустичного екрану жорсткого типу, розташованого у внутрішній порожнині оболонки. Кільцевий зазор, що утворився при цьому, заповнений рідиною. Отримані аналітичні вирази, що описують звукові поля у зазорі та у зовнішньому просторі. Виконані числові розрахунки, аналіз яких дозволив встановити закономірності поведінки частотних характеристик перетворювача від розмірів внутрішнього зазору. Їх осмислення дозволило запропонувати новий шлях управління резонансними частотами гідроакустичних перетворювачів. Бібл. 1, рис. 3.

**Ключові слова:** перетворювач п'єзокерамічний, екран акустичний м'який, зазор внутрішньосмуговий водозаповнений.

UDC 534.3

## On one of the ways to control the resonant frequency of circular cylindrical transducers.

U.Y. Melenko

State scientific-research institute of hydrodevices,  
str. Surikov 3, city Kyiv, 03035, Ukraine.

It was researched acoustics characteristics of ring cylindrical transducer, that create from ceramic envelope and coaxial rigid cylindrical acoustic baffle, that placed in inside cavity of envelope. The created annular gap filled with liquid. Was get analytical expressions, that describe

---

sound fields out and inside of transducer. Complete numerical calculations and made his analyze. Founded regularities change properties of transducer from annular gap dimensions. Their comprehension gave possibility to suggest a new way manage of resonance frequency hydroacoustic transducers. References 1, figures 3.

**Keywords:** *piezoelectric transducer, acoustic screen is soft, water-filled-band gap.*

#### References

1. *Leiko A.G., Shamarin Y.E., Tkachenko V.P.* (2000), [Underwater acoustic antenna]. Kyiv, P. 320.(Rus)

*Поступила в редакцию 15 декабря 2012 г.*