

УДК534.3

Свойства цилиндрического пьезокерамического излучателя с упругой цилиндрической оболочкой во внутренней полости

Ю.Я. Меленко

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

Исследованы резонансные свойства сложной электромеханической колебательной системы, образованной пьезокерамической цилиндрической оболочкой, соосной с ней полый металлической оболочкой во внутренней полости и жидкостью в кольцевом пространстве между обеими оболочками. Библ. 1, рис. 3.

Ключевые слова: преобразователь пьезо-керамический, оболочка внутренняя металлическая, зазор кольцевой водозаполненный.

Введение

В ряде конструкций гидроакустических станций различного назначения, например, в авиационных радиогидроакустических буюх, с целью максимального использования выделенных объемов для размещения в них аппаратуры станции часть радиоэлектронной аппаратуры располагают во внутренней полости гидроакустических преобразователей станции. При этом аппаратурные отсеки представляют собой заполненные воздухом коаксиальные металлические цилиндрические оболочки. Если кольцевые полости между пьезокерамическими кольцами и металлическими оболочками заполняются жидкостью, то слой жидкости совместно с оболочкой в виде трубы оказывают сопротивление колебаниям внутренней поверхности пьезокерамической оболочки. Поскольку и слой жидкости, и оболочка обладают собственными резонансными свойствами, то в совокупности они должны определенным образом влиять на резонансные свойства преобразователя-излучателя в целом.

Целью данной статьи является исследование резонансных свойств излучателей подобного типа, представляющих собой сложные механические колебательные системы.

Вывод аналитических соотношений

Рассмотрим излучатель в виде бесконечной пьезокерамической оболочки, набранной из соосно расположенных колец 1. Снаружи излучатель окружен рабочей средой с волновым сопротивлением ρc . В полости оболочки концен-

трично расположена тонкостенная упругая труба 2 и тонкие пластины, закрепленные по контуру на недеформируемых опорах. В трубе вакуум ($\rho_3 c_3 = 0$). Кольцевая полость между оболочкой 1 и трубой 2 заполнена жидкостью с волновым сопротивлением $\rho_1 c_1$. Необходимые для решения задачи размеры, системы координат и обозначения представлены на рис. 1. Определим звуковые поля в кольцевой полости (область I) и в окружающем пространстве (область II).

Из структуры излучателя следует, что осевая составляющая колебательной скорости в областях I и II равна нулю и обмен звуковой энергией между указанными областями осуществляется через пьезокерамическое кольцо.

Для такой периодической структуры граничные условия и поля в областях I и II запишем в следующем виде:

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} = 0; \quad r_2 \leq r \leq r_1; \quad |z| = h,$$

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} = 0; \quad r \geq r_0; \quad |z| = h,$$

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

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

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

Тогда давление и колебательные скорости в областях I и II представим выражениями:

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

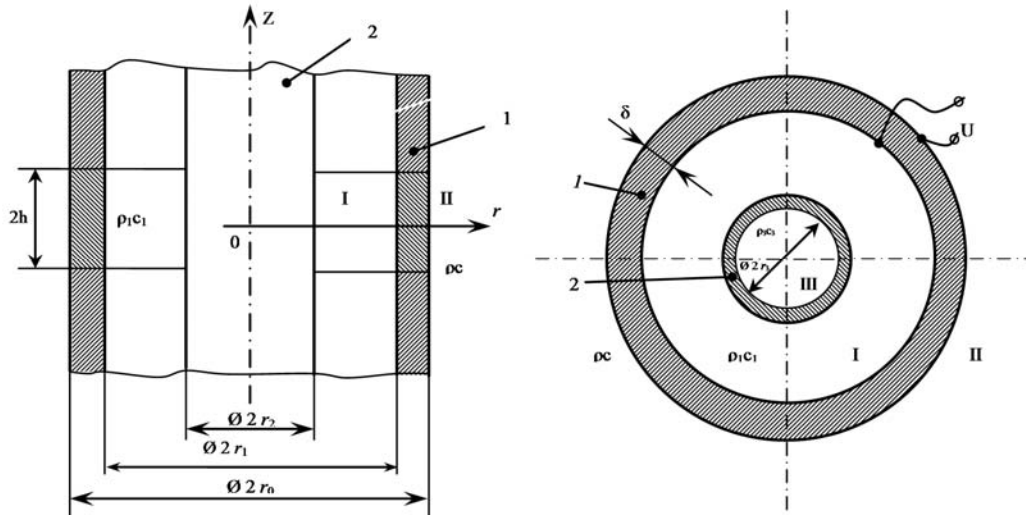


Рис. 1.

Учитывая реакцию упругой трубы через ее собственный импеданс $z_{\text{тр}}$, запишем условия сопряжения:

$$\begin{aligned} P_2|_{r=r_0} - P_1|_{r=r_1} + v_0 z_{\text{об}} &= n_m U; \\ v_1|_{r=r_1} = v_2|_{r=r_0} &= v_0; \\ -P_1|_{r=r_2} + v_{\text{мп}} z_{\text{тр}} &= 0; \\ v_1|_{r=r_2} &= v_{\text{мп}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $v_{\text{мп}}$ – колебательная скорость трубы.

Поставив соответствующие значения из (1) в условия (2), получим систему алгебраических уравнений для определения неизвестных A_0 , B_0 , C_0 , v_0 и $v_{\text{мп}}$.

$$\begin{aligned} -j\omega\rho C_0 H_0^{(1)}(kr_0) + j\omega\rho_1 [A_0 J_0(k_1 r_1) + B_0 N_0(k_1 r_1)] + v_0 z_{\text{об}} &= n_m U; \\ k_1 [A_0 J_1(k_1 r) + B_0 N_1(k_1 r)] &= v_0; \\ k C_0 H_1^{(1)}(kr_0) &= v_0; \\ j\omega\rho_1 [A_0 J_0(k_1 r_2) + B_0 N_0(k_1 r_2)] + v_{\text{мп}} z_{\text{тр}} &= 0; \\ k_1 [A_0 J_1(k_1 r_2) + B_0 N_1(k_1 r_2)] &= v_{\text{мп}}; \end{aligned} \quad (3)$$

Определив неизвестные коэффициенты A_0 , B_0 , C_0 и, подставив их в 4-е уравнение системы (3), запишем выражения, показывающее связь

между колебательными скоростями пьезокерамической оболочки v_0 и упругой трубы $v_{\text{мп}}$.

$$\begin{aligned} v_0 [j\rho_1 c_1 \frac{2}{\pi k_1 r_2} \frac{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)}] &= \\ = v_{\text{мп}} [z_{\text{мп}} + j\rho_1 c_1 \frac{J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)}] \end{aligned} \quad (4)$$

Очевидно, что множители в квадратных скобках при колебательных скоростях представляют некоторые импедансы. При этом множитель в квадратных скобках при v_0 условно назовем вносимым на поверхность оболочки импедансом, появляющимся за счет наличия упругой трубы. Множитель в квадратных скобках при $v_{\text{мп}}$ представляет сумму импедансов – собственного импеданса упругой трубы $z_{\text{мп}}$ и импеданса излучения упругой трубы в кольцевую полость с жидкостью при условии, что внутренняя поверхность пьезокерамической оболочки абсолютно жесткая. Отношение импедансов при колебательных скоростях v_0 и $v_{\text{мп}}$ представляют своеобразный частотнозависимый коэффициент. Назовем его коэффициентом передачи колебаний пьезокерамической оболочки упругой трубе и обозначим его $K^{(1)}$

$$K^{(1)} = \frac{v_{\text{мп}}}{v_0} = \frac{j\rho_1 c_1 \frac{2}{\pi k_1 r_2} \frac{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)}}{z_{\text{мп}} + j\rho_1 c_1 \frac{J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)}}. \quad (5)$$

Подставив выражения для коэффициентов A_0 , B_0 и C_0 в первое уравнение системы (3), получим выражение, показывающее также

$$\begin{aligned} v_0 [z_{об} - j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)}] - n_m U = \\ = v_{mp} [j\rho_1 c_1 \frac{2}{\pi k_1 r_2} \frac{1}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)}]. \end{aligned} \quad (6)$$

В выражении (6) множители в квадратных скобках при колебательных скоростях v_0 и v_{mp} представляют импедансы аналогично с выражением (4). Множитель в квадратных скобках при v_0 представляет механический импеданс колебательной системы с абсолютно жестким стержнем и состоит из суммы следующих импедансов: собственного механического импеданса пьезокерамической оболочки, импеданса излучения во внешнее пространство и импеданса излучения в полость оболочки с жидкостью при наличии в полости жесткого стержня. Множитель в квадратных скобках при v_{mp} , как и в выражении (4), назовем вносимым импедансом на

связь между колебательными скоростями v_0 и v_{mp} , но с участием возбуждающего напряжения.

поверхности упругой трубы. Таким образом, отличие выражений (4) и (6) состоит в следующем. В выражении (4) – упругая труба с собственным импедансом z_{mp} излучает в кольцевую полость, ограниченную жесткой внешней оболочкой с появлением вносимого сопротивления на поверхности оболочки. В выражении (6) – пьезокерамическая оболочка с собственным импедансом $z_{об}$ излучает во внешнее пространство и в кольцевую полость с жестким стержнем с появлением вносимого сопротивления на поверхности стержня.

Из выражений (4) и (6) с использованием выражения (5) определяем колебательную скорость v_0 пьезокерамической оболочки

$$v_0 = \frac{n_m U}{z_{об} - j\rho c \frac{H_0^{(1)}(kr_0)}{H_1^{(1)}(kr_0)} + j\rho_1 c_1 \frac{J_0(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + j\rho_1 c_1 \frac{2}{\pi k_1 r_2} \frac{1}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} K^{(1)}} \quad (7)$$

В выражении (7) в знаменателе имеем механический импеданс колебательной системы z_M , состоящий из собственного импеданса пьезокерамической оболочки $z_{об}$, импеданса излу-

чения во внешнее пространство z_2 и импеданса излучения во внутреннюю полость z_1 , т.е.

$$z_M = z_2 + z_1 + z_{об}, \text{ где}$$

$$z_1 = j\rho_1 c_1 \left[\frac{J_0(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_0(k_1 r_1)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} + \frac{2}{\pi k_1 r_2} \frac{1}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} K^{(1)} \right]. \quad (8)$$

Собственный импеданс упругой трубы в выражении (8) учитывается коэффициентом $K^{(1)}$.

С учетом принятых обозначений колебательные скорости оболочки и трубы можно представить в компактном виде:

$$v_0 = \frac{n_m U}{z_M}; \quad v_{mp} = \frac{n_m U}{z_M} K^{(1)} v_{mp}.$$

Определив в системе (3) неизвестные коэффициенты A_0 , B_0 , и C_0 и подставив их в (1),

запишем выражения для давлений и колебательных скоростей в областях I и II.

$$p_1 = -j\rho_1 c_1 \frac{n_m U}{z_M} \left[\frac{J_0(k_1 r) N_0(k_1 r_2) - J_0(k_1 r_2) N_0(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} - \frac{J_1(k_1 r) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_1) N_0(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} \right] K^{(1)}_1;$$

$$p_2 = -j\rho c \frac{n_m U}{z_M} \frac{H_0^{(1)}(kr)}{H_1^{(1)}(kr_0)};$$

$$v_1 = \frac{n_m U}{z_M} \left[\frac{J_1(k_1 r) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} - \frac{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_1) - J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r)}{J_1(k_1 r_1) N_1(k_1 r_2) - J_1(k_1 r_2) N_1(k_1 r_1)} \right] K^{(1)}_1;$$

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

Из приведенных выражений видно, что такие параметры как p_1 и v_1 , p_2 и v_2 , а также z_M в значительной мере зависят от импеданса излучения в кольцевую полость z_1 , определяемого выражением (8). Импеданс z_1 учитывает как импеданс трубы z_{mp} , так и импеданс кольцевого слоя жидкости. В случае, если $z_{mp} \rightarrow \infty$ выражение (8) преобразуется в выражение для z_1 , имеющее место при наличии жесткого стержня в полости пьезокерамической оболочки. При $z_{mp} \rightarrow 0$ выражение (8) преобразуется в выражение для z_1 , имеющее место при наличии акустически мягкого стержня в полости пьезокерамической оболочки. Равенство $z_{mp} = \infty$ и $z_{mp} = 0$ является предельными случаями резонансных свойств рассматриваемой системы.

Анализ результатов расчетов

С использованием полученных соотношений были выполнены расчеты параметров преобразователей рассматриваемого типа для случая $\rho_1 c_1 = \rho c$ и $\rho_3 c_3 = 0$. Вычисления производились для пьезокерамической оболочки состава ТБК-3 размерами $r_0 = 0,102$ м, $r_1 = 0,083$ м. Отношение радиусов оболочки и трубы $\frac{r_2}{r_1} = 0,83$.

Толщина трубы 0,0095 м. Плотность и упругость материалы трубы таковы, что резонансные частоты в вакууме пьезокерамической оболочки и трубы одинаковы, т.е. $\omega_0 = \omega_{mp}$. Механическая добротность трубы составляла $Q_M = 15$.

На рис.2 приведены частотные зависимости активной (кривые 1 и 2) и реактивной (кривые 3 и 4) составляющих механического импеданса z_M (кривые 1 и 3) и импеданса излучения z_1 в

полость пьезокерамической оболочки (кривые 2 и 4).

Приведенные значения составляющих импедансов z_M и z_1 имеют ярко выраженный частотнозависимый характер. Реактивная составляющая z_M имеет ряд переходов через ось абсцисс (резонансы системы) и разрывы (антирезонансы). Можно сказать, что исследуемая колебательная система многорезонансная. Положение резонансов на шкале частот зависят от величины зазора между пьезокерамической оболочкой и трубой, характеризуемого отношением $\frac{r_2}{r_1}$. На рис. 3 приведены кривые, характеризующие зависимость резонансных частот колебательной системы $\frac{\omega_p}{\omega_0}$ от величины коль-

цевого зазора $\frac{r_2}{r_1}$. Для приведенных зависимо-

стей соблюдалось условие равенства резонансных частот в вакууме пьезокерамической оболочки и трубы ($\omega_0 = \omega_p$). В данном случае в исследуемом диапазоне переменного параметра $\frac{r_2}{r_1}$ колебательная система имеет до трех резонансов – первый низкочастотный (кривая 1), лежащий ниже по шкале частот собственного резонанса пьезокерамической оболочки ω_0 , два высокочастотных (кривые 2 и 3), лежащих выше ω_0 . Расположение резонансов исследуемой колебательной системы на шкале частот при $\omega_{mp}/\omega_0 \leq 1$ по характеру близко к случаю пьезокерамической оболочки с акустически мягким стержнем. Из сказанного выше следует, что наличие трубы с $\omega_{mp}/\omega_0 \leq 1$ в полости пьезокерамической оболочки снижает частоту первого резонанса всей колебательной системы ω_p .

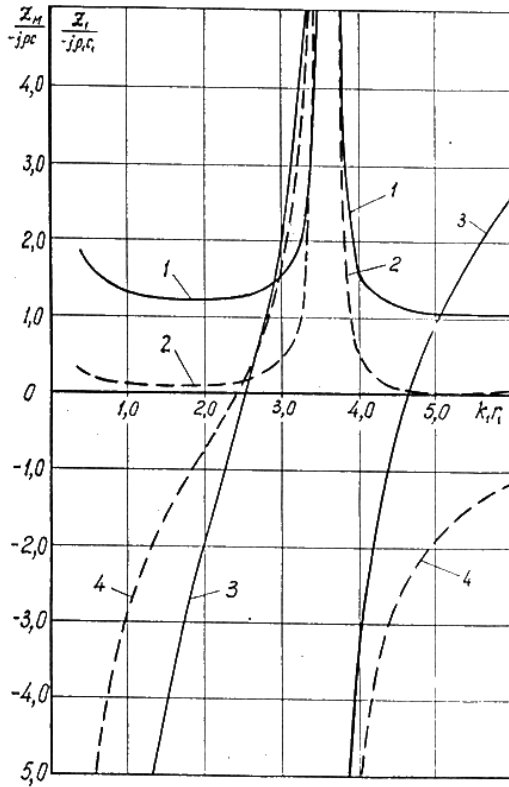


Рис. 2.

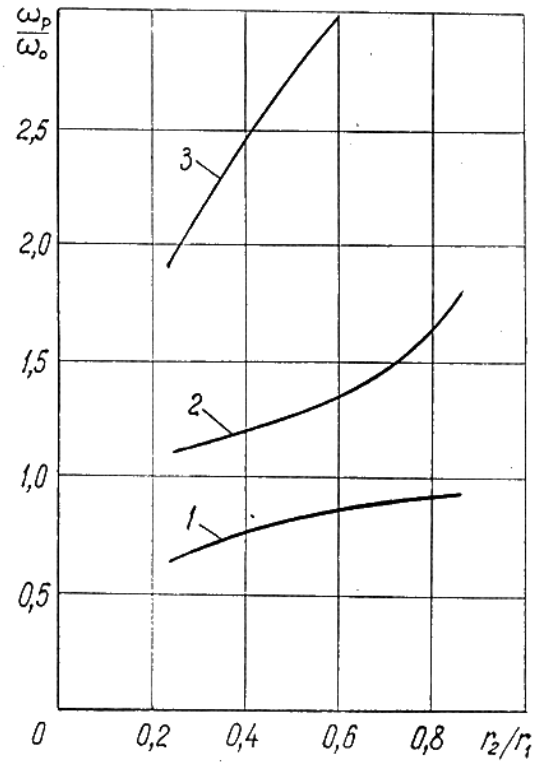


Рис. 3.

Выводы

Приведенные результаты исследований показывают, что применение упругой трубы, расположенной в полости пьезокерамической оболочки с жидкостью, с изменением ее параметров является одним из методов управления резонансными свойствами механических колебательных систем цилиндрического типа. Управление может осуществляться путем соответствующего выбора таких параметров как величина соотношения радиусов трубы и внутренней

поверхности пьезокерамической оболочки $\frac{r_2}{r_1}$, а также величиной отношения резонансных частот трубы и пьезокерамической оболочки.

Литература

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

УДК534.3

Властивості циліндричного п'єзокерамічного випромінювача з пружною циліндричною оболонкою у внутрішній порожнині

Ю.Я. МеленкоДП «Київський НДІ Гідроприладів»,
вул. Сурикова,3, м. Київ, 03035, Україна.

Досліджені резонансні властивості складної електромеханічної коливальної системи, утвореної із співвісних зовнішньої п'єзокерамічної і внутрішньої пружної полої тонкої оболонки та рідини, що заповнює кільцеву порожнину між внутрішньою поверхнею п'єзокерамічної оболонки та пружною оболонкою. Отримані аналітичні вирази, що описують звукове поле у внутрішній частині такого випромінювача та в його внутрішній кільцевій порожнині. Виконані числові розрахунки та здійснено їх аналіз. Визначені параметри, вибором яких можливо керувати резонансними властивостями перетворювачів подібного типу. Бібл. 1, рис. 3.

Ключові слова: *перетворювач п'єзокерамічний, оболонка внутрішня металева, зазор кільцевий водозаповнений.*

UDC 534.3

Properties of ceramic transmitter with elastic cylindrical envelope in inside cavity

U.Y. MelenkoState scientific-research institute of Hydrodevices,
str. Surikov, 3, Kyiv, 03035, Ukraine.

Researched resonance properties of complex electromechanical oscillation system, created from coaxial outside ceramic and inside elastic cavity envelope in liquid. Was get analytical expressions, that describe sound fields outside transducer and inside his ring cavity. Complete numerical calculations and made his analyze. Determined parameters, and with their choice we can manage resonance frequency this type transducers. Reference 1, figures 3.

Keywords: *piezoceramic transducer, inside a metal shell, water-ring gap.*

References

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

Поступила в редакцію 11 ноября 2012 г.