УДК 534.232

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ, ВНУТРИ КОТОРОГО РАСПОЛОЖЕНА РЕШЕТКА ИЗ УПРУГИХ ОБОЛОЧЕК

В. С. КОЦЮБА

Государственный НИИ гидроприборов, Киев

Получено 06.12.2010

Рассмотрен цилиндрический излучатель с решеткой из упругих оболочек, расположенных в полости его пьезокерамической оболочки. Исследованы параметры такого излучателя в зависимости от собственных частот упругих оболочек.

Розглянуто циліндричний випромінювач з решіткою пружних оболонок, розташованих у порожнині його п'єзокерамічної оболонки. Досліджено параметри такого випромінювача в залежності від резонансних частот пружних оболонок.

A cylindrical radiator with an array of elastic shells placed inside its internal cavity has been considered. The parameters of such radiator have been studied in dependence from eigenfrequencies of elastic shells.

введение

В гидроакустической технике широко используются излучатели звука, выполненные в виде цилиндрических пьезокерамических оболочек, в полости которых располагаются экранирующие устройства [1,2]. Последние выполняются из пористых резин, пенопластов [2], резиноармированных элементов [3]. Такие устройства громоздки, а условия их эксплуатации имеют существенные ограничения по рабочим глубинам и срокам службы. На практике нашли применение металлические экранирующие устройства в виде решеток из плоских упругих оболочек, работающих на колебаниях изгиба [4,5]. Известно, что собственные частоты такой оболочки пропорциональны толщине стенки и обратно пропорциональны квадрату линейного размера поперечного сечения. Это позволяет обеспечить малые абсолютные и волновые размеры поперечного сечения таких элементов и свободно размещать их в полости пьезокерамической оболочки, заполненной жидкостью. Они имеют практически неограниченный срок службы и увеличенные рабочие глубины. Следовательно, применение экранирующих устройств из таких оболочек в составе гидроакустических цилиндрических излучателей значительно повышает эксплуатационные возможности последних.

Данная статья посвящена теоретическому оцениванию рабочих параметров одной из возможных конструктивных схем описанных излучателей.

1. ТЕОРИЯ

Рассмотрим физическую модель излучателя в виде бесконечной пьезокерамической оболочки, в полости которой расположена одномерная периодическая решетка из упругих оболочек (рис. 1). Снаружи пьезокерамическая оболочка 1 окружена жидкостью с волновым сопротивлением ρc , а ее полость заполнена жидкостью с волновым сопротивлением $\rho_1 c_1$. Каждый элемент решетки представляет собой плоскую оболочку, образованную двумя круглыми пластинами 2, шарнирно закрепленными на жесткой кольцевой опоре 3. Внутри упругих оболочек - вакуум. Пластины предполагаются достаточно тонкими с тем, чтобы в исследуемом диапазоне частот пренебречь колебаниями по толщине и принять во внимание только изгибные колебания [6,7].

Учитывая периодичность решетки и характер колебаний пьезокерамической оболочки, ограничимся рассмотрением только одного периода. Тогда всю область существования звукового поля можно разбить на частичные области [8]:

I:
$$0 \le r \le r_2; |z| \le a,$$

II: $r \ge r_0; |z| \le b,$
III: $r_2 \le r \le r_1; |z| \le b.$

© В. С. Коцюба, 2010

Граничные условия для них будут иметь вид:

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} = 0; \qquad r \ge r_0; \qquad |z| \le b,$$
$$\frac{\partial \Phi_3}{\partial z} = 0; \quad r_2 \le r \le r_1; \qquad |z| = b, \qquad (1)$$
$$\frac{\partial \Phi_3}{\partial r} = 0; \qquad r = r_2; \quad a \le |z| \le b,$$

где через Φ_2 и Φ_3 обозначены потенциалы колебательных скоростей в соответствующих подобластях.

Используем известные представления волновых функций в волноводе в цилиндрической системе координат [8, 9] и запишем потенциалы Φ_j для подобластей в форме рядов с учетом граничных условий (1) и пульсирующих колебаний пьезокерамической оболочки под воздействием возбуждающего электрического напряжения:

$$\Phi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n F_0(k_n r) \cos \frac{\pi n}{a} z + \sum_{p=1}^{\infty} B_p J_0(\nu_p r) \cos k_p z,$$
(2)

$$\Phi_2 = C_0 H_0^{(1)}(kr), \tag{3}$$

$$\Phi_3 = \sum_{q=0}^{\infty} [C_q F_0(k_q r) + D_q G_0(k_q r)] \cos \frac{\pi q}{b} z, \quad (4$$

где

$$k_n^2 = k_1^2 - \left(\frac{\pi n}{a}\right)^2;$$

$$k_q^2 = k_1^2 - \left(\frac{\pi q}{b}\right)^2;$$

$$k_p = k_1^2 - \nu_p^2,$$

$$F_0(k_n r) = \left\{ egin{array}{ccc} J_0(k_n r) & \mbox{при} & k_1 \geq \pi n/a, \\ & & \\ I_0(k_n r) & \mbox{при} & k_1 < \pi n/a; \end{array}
ight.$$

$$G_0(k_q r) = \begin{cases} J_0(k_q r) & \text{при} \quad k_1 \ge \pi q/b, \\ \\ I_0(k_q r) & \text{при} \quad k_1 < \pi q/b; \end{cases}$$

 ν_p – корни трансцендентного уравнения $J_0(nu_pr_2)=0; A_n, B_p, C_0, C_q, D_q$ – неизвестные комплексные коэффициенты.



Рис. 1. Схема осевого сечения цилиндрического излучателя с решеткой

Предположив ранее, что пластины закреплены по контуру шарнирно, их колебательную скорость представим в виде ряда по собственным формам колебаний в вакууме:

$$v_{n\pi}(r) = \sum_{s=1}^{\infty} F_s \Delta_s(r), \tag{5}$$

где $\Delta_s(r) = I_0(\beta_s r) - L_0 I_0(\beta_s r)$. Неизвестные β_s и L_0 определяются из двух условий [6]. Первое из них – равенство нулю перемещений пластин по контуру

$$v_{\pi\pi}(r)|_{r=r_2} = 0, (6)$$

а второе – равенство нулю момента по контуру

$$\left. \frac{\partial^2 v_{\text{пл}}(r)}{\partial r^2} \right|_{r=r_2} = 0.$$
(7)

Из соотношений (6) и (7) получаем

$$L_0 = \frac{J_0(\beta_s r_2)}{I_0(\beta_s r_2)}, \qquad \beta_s = \frac{\alpha_s}{r_2},$$

где α_s – табулированные коэффициенты [6].

С учетом связи звуковых полей во II и III частичных областях через пьезокерамическую оболочку запишем систему функциональных уравнений, объединяющих условия сопряжения компонент звукового поля на границах частичных областей, колебательных скоростей пластин и окружа-

В. С. Коцюба



Рис. 2. Частотная зависимость импеданса излучения пьезокерамической оболочки во внутреннюю полость

ющей среды, и звуковых давлений в жидкой среде:

$$P_{2}|_{r=r_{0}} - P_{3}|_{r=r_{1}} + +v_{0}Z_{o6} = n_{T}U; \quad |z| \leq b,$$

$$v_{2}|_{r=r_{0}} = v_{0}; \quad |z| \leq b,$$

$$v_{3}|_{r=r_{1}} = v_{0}; \quad |z| \leq b,$$

$$P_{1}|_{r=r_{2}} = P_{3}|_{r=r_{2}}; \quad |z| \leq a,$$

$$v_{3}|_{r=r_{2}} = v_{1}/r_{r=r_{2}}; \quad |z| \leq a,$$

$$v_{3}|_{r=r_{2}} = 0; \quad a \leq |z| \leq b,$$

$$v_{1}|_{z=a} = v_{n\pi}(r); \quad 0 \leq r \leq r_{2},$$

$$\frac{\partial^{4}v_{n\pi}(r)}{\partial r^{4}} - k_{n\pi}^{4}v_{n\pi}(r) = -j\frac{\omega}{D_{n\pi}}P_{1}|_{z=a}; \quad 0 \leq r \leq r_{2}.$$
(8)

Здесь v_0 – колебательная скорость пьезокерамической оболочки; $n_{\rm T}$ – коэффициент электромеханической трансформации пьезокерамической оболочки;

$$k_{\rm n,n} = \left(\frac{\omega^2 \rho_{\rm n,n} h_{\rm n,n}}{D_{\rm n,n}}\right)^{1/4}; \qquad D_{\rm n,n} = \frac{E_{\rm n,n} h_{\rm n,n}^3}{12(1-\sigma^2)};$$

 $\rho_{\rm пл}, h_{\rm пл}, E_{\rm пл}, \sigma$ – плотность, толщина, модуль упругости и коэффициент Пуассона пластины соответственно.

Подставив в систему (8) давления и колебательные скорости, выраженные соответственно через ряды (2) - (7), получим систему функциональных уравнений в развернутом виде. Ввиду громоздкости она здесь не приведена.

Структура рядов для потенциалов колебательных скоростей Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 и колебательной скорости пластин $v_{nn}(r)$ позволяет провести переход от системы функциональных уравнений к бесконечной линейной алгебраической системе. Алгебраизация системы функциональных уравнений выполняется стандартным способом [8] на основе свойств полноты и ортогональности функций $\cos(\pi n z/a)$ и $\cos(\pi q z/b)$ соответственно на интервалах $0 \le z \le a$ и $0 \le z \le b$, а также функций $J_0(\nu_p r)$, $F_0(k_n r)$, $J_0(\beta_s r)$ и $I_0(\beta_s r)$ на интервале $0 \le r \le r_2$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В процессе выполнения вычислений выбор порядка конечной алгебраической системы при использовании метода редукции осуществляется на основе сравнения результатов, полученных при последовательном увеличении числа удерживаемых уравнений. Расчеты производились для пьезокерамических оболочек из составов ТБК-3 и ЦТБС-3. Считалось, что во внутренней полости пьезокерамической оболочки расположена решетка из упругих титановых оболочек. Физические характеристики этих материалов можно найти, например, в [10]. Относительные геометрические характеристики решетки были приняты следующими: $r_1/r_2=0.32$, $a/r_2=1$, $(b-a)/r_2=0.06$.

Как показано в [11], основной вклад в резонансные свойства подобных колебательных систем вносит импеданс излучения во внутреннюю полость пьезокерамической оболочки Z_1 . В связи с этим анализ количественных данных начнем с указанной величины. На рис. 2 представлены частотные зависимости импеданса излучения пьезокерамической оболочки во внутреннюю полость, заполненную водой. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют относительным толщинам упругих оболочек $h/r_2=0.021, 0.0315$ и 0.0475. Здесь же для сравнения приведена реактивная составляющая импеданса излучения пьезокерамической оболочки во внешнее пространство (кривая 4).

В данном случае импеданс Z_1 имеет чисто реактивный характер, так как в областях существования поля I и III отсутствуют потери (предполагалось отсутствие диссипации энергии в упругих пластинах периодической решетки). На частотных зависимостях Z_1 наблюдается характерное чередование резонансов ($Z_1=0$) и антирезо-



Рис. 3. Частотная зависимость ${\rm Im}\,Z_{\rm m}$ для излучателя из пьезоекрамики ЦТБС-3

нансов ($Z_1 = \infty$, кривые на графиках имеют разрывы). Совершенно иначе ведет себя реактивная часть импеданса излучения во внешнее пространство (кривая 4). Она изменяется плавно, имеет исключительно инерционный характер и ее нормированная величина не превышает 0.4. Поэтому очевидно, что основное влияние на частотную зависимость реактивной составляющей механического импеданса оказывает именно Z_1 .

На рис. 3 и 4 приведены частотные зависимости $\operatorname{Im} Z_{\text{м}}$ для колебательной системы "пьезокерамическая оболочка-внешняя среда-жидкость во внутренней плоскости-упругие оболочки периодической решетки". Данные, приведенные на рис. 3, соответствуют пьезокерамике состава ЦТБС-3, а на рис. 4 – ТБК-3. На графиках кривые 1, 2 и 3 соответствуют относительным толщинам упругой оболочки $h/r_2 = 0.021, 0.0315$ и 0.0475. Кривые 4 соответствуют реактивной части импеданса пьезокерамической оболочки $\operatorname{Im} Z_{ob}$. В рассматриваемых случаях отношение низших собственных частот упругих оболочек (первая мода) и пьезокерамических оболочек составляло $\omega_1/\omega_0 = 0.36$; 0.54 и 0.811 (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

Приведенные на рис. 3 и 4 результаты указывают на значительное различие резонансных свойств исследуемой колебательной системы и пьезокерамической оболочки в вакууме. У полной колебательной системы наблюдается чередование резонансов и антирезонансов. При этом частоты резонансов расположены по шкале частот как ниже частоты резонанса пьезокерамической оболочки,



Рис. 4. Частотная зависимость $\operatorname{Im} Z_{\text{м}}$ для излучателя из пьезоекрамики ЦТБС-3

так и выше него. Расположение резонансов колебательной системы в основном зависит от собственных частот упругих оболочек и в меньшей мере – от собственных частот пьезокерамической оболочки. Таким образом, установление решетки из упругих оболочек во внутреннюю полость пьезокерамической цилиндрической оболочки и изменение ее резонансных свойств путем изменения одного из параметров решетки (например, толщины пластин), создает возможность эффективно сдвигать положение резонансных частот излучателя в целом.

выводы

- Предложен цилиндрический пьезокерамический излучатель с решеткой из упругих металлических оболочек, применение которых позволяет повысить эксплуатационные характеристики излучателя – увеличить рабочую глубину и срок службы.
- Сформулирована математическая модель излучателя и разработан метод, позволяющий проводить оценку параметров излучателя.
- Проведены расчеты параметров излучателя в широком диапазоне частот и установлены количественные связи между параметрами решетки из упругих оболочек и параметрами рассматриваемого излучателя. В частности, установлено, что:

- у излучателя в исследуемом диапазоне частот наблюдается чередование резонансов и антирезонансов; при этом частоты резонансов и антирезонансов расположены на шкале частот как ниже, так и выше резонанса пьезокерамической оболочки в вакууме;
- расположение резонансов излучателя в основном зависит от собственных частот упругих оболочек.
- 4. Изменение резонансных частот рассматриваемого излучателя может осуществляться путем изменения одного из параметров решетки из упругих оболочек. Это может служить одним из методов управления резонансными свойствами исследуемой колебательной системы. Указанный прием может быть положен в основу создания цилиндрических излучателей с изменяемыми параметрами и расширенными диапазонами рабочих частот.
- 1. Орлов Л. В., Шабров А. А. Гидроакустическая аппаратура рыбопоискового флота (расчет и проектирование).– Л.: Судостроение, 1987.– 222 с.

- 2. Подводные электроакустические преобразователи / Под ред. В. В. Богородского.– Л.: Судостроение, 1983.– 248 с.
- 3. Глазанов В. Е. Экранирование гидроакустических антенн.– Л.: Судостроение, 1986.– 148 с.
- Артеменкова В. А, Вовк И. В., Кононученко Л. А., Коцюба В. С. Экспериментальные исследования экранирующих свойств решеток, состоящих из воздухонаполненных металлических оболочек // Вопросы судостроения.– 1976.– 9.– С. 58–63.
- 5. Вовк И. В., Гринченко В. Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках.– К.: Наук. думка, 1986.– 238 с.
- 6. Гонткевич В. С. Собственные колебания пластин и оболочек.– К.: Наук. думка, 1964.– 287 с.
- Лямшев Л. М. Отражения звука тонкими пластинами и оболочками в жидкости.– М.: Изд-во АН СССР, 1955.– 71 с.
- 8. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Маципура В. Т. Основи акустики.– К.: Наук. думка, 2007.– 640 с.
- 9. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука.– М.: Изд-во МГУ, 1960.– 336 с.
- Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А. Механика связанных полей в элементах конструкций. Том. 5. Электроупругость. – К.: Наук. думка, 1989. – 290 с.
- Басовский В. Г., Вовк И. В. Излучение звука конечной решеткой, состоящий из открытых жестких цилиндрических оболочек // Акуст. ж.– 1998.– 44, № 5.– С. 581–590.