



**“Fizika-2005”
Beynəlxalq Konfrans
International Conference
Международная Конференция**

7 - 9 **İyun** **June** **2005** №136 **səhifə** **page** **516-520**
Июнь **стр.**



Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ
ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

**КУРБАНОВ М.А., МУСАЕВА С.Н., ИМАМВЕРДИЕВ К.М.,
ГЕЙДАРОВ Г.М., АЛИЕВ Г.Г.**

Институт Физики Национальной Академии Наук Азербайджана
mkurbanov@physics.ab.az

Излагается электромеханическая модель композитных электроакустических преобразователей, на основе которой оптимизированы их конструкционные параметры с учетом получения максимальной акустической чувствительности.

Известно, что улучшение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) электроакустических и акустоэлектрических пьезопреобразователей осуществляется, в основном, двумя способами:

1. разработкой более эффективных пьезочувствительных элементов с различными электрофизическими и физико-механическими параметрами [1];
2. оптимизацией конструкционных параметров преобразователей [2,3].

Для более наглядного показания многофакторности основных характеристик пьезоэлектрических преобразователей приведем некоторые данные о зависимости их пьезочувствительности от конфигурации, модуля Юнга и толщины пьезокомпозитного элемента.

Конфигурация пьезоэлемента сильно влияет на АЧХ преобразователя (таблица 1). Вариация конфигурации пьезокомпозитного элемента приводит к изменению его модуля упругости, электрической емкости, пьезомодуля d_{ij} и пьезочувствительности g_{ij} . Все эти параметры при оптимальных конструкциях и конфигурациях повышают эксплуатационных показателей преобразователя.

Из таблицы 1 и рис.1 видно, что АЧХ преобразователя имеет несколько максимумов. Толщина пьезоэлемента и диафрагмы, конфигурации и их модули Юнга влияют на амплитуду и частоте возникновения этих максимумов (рис.2).

Таблица 1. Зависимость мощности излучения и АЧХ преобразователя от конфигурации пьезоэлемента при напряжении 10 В.

Частота $f, Гц$	$P, Па$ плоский элемент	$P, Па$ сферически й элемент
200	2	4,7
400	3	5,5
500	3,8	5,6
600	10,5	6,0
700	10,0	6,25
800	5,25	7,0
900	26,0	8,2
1000	6,25	9,0
1200	4,0	16,0
1300	3,0	24,5
1400	2,82	45,0
1500	4,0	68,0
1800	1,8	11,0
2000	1,9	7,5
2500	2,1	2,25
3000	0,1	2,25
4000	0,17	2,5

Эксперименты показывают, что резонансные частоты и чувствительность в этих частотах, а также частотный диапазон преобразователя зависят от модуля Юнга и толщины пьезокомпозитного элемента. Зависимость резонансных частот от модуля Юнга и толщины мембраны имеет сложный характер. Вторая

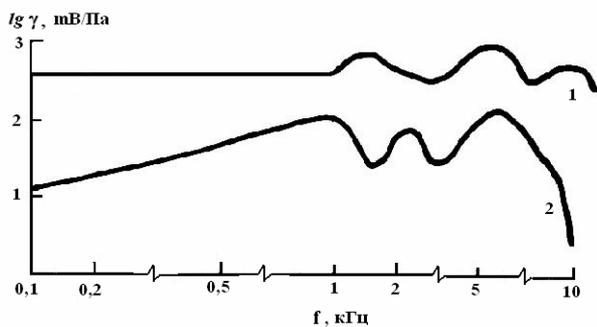


Рис.1. АЧХ пьезокомпозитного преобразователя из ПВДФ+ПП+ПКР-3М. 1 – сферический элемент; 2 – плоский элемент.

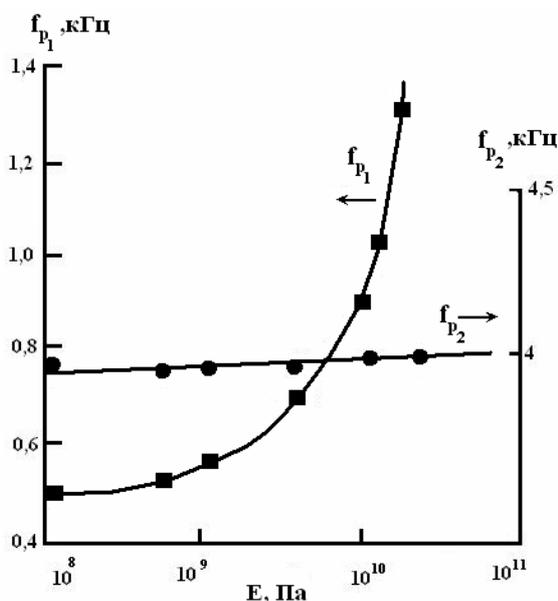


Рис.2. Зависимость резонансных частот пьезокомпозитного преобразователя от модуля Юнга мембраны.

резонансная частота (f_{p2}) АЧХ в зависимости от модуля Юнга практически не изменяется (рис.2), а первая резонансная частота (f_{p1}) заметно изменяется и приблизительно в интервале $(5 \cdot 10^9 \div 5 \cdot 10^{10}) \frac{H}{M^2}$ это изменение имеет нелинейный характер.

На рис.3 показана зависимость чувствительности композитного преобразователя от толщины пьезоэлемента. Из рисунка видно, что при толщине пьезоэлемента 200 мкм акустическая чувствительность γ имеет максимальное значение. Приблизительно такая зависимость получается, если в качестве мембраны использовать бронзовую пластинку. При изменении толщины бронзовой пластины в пределах $(100 \div 200) \text{ мкм}$ мощность излучения и приемная чувствительность γ пьезокомпозитного преобразователя имеют максимальные значения.

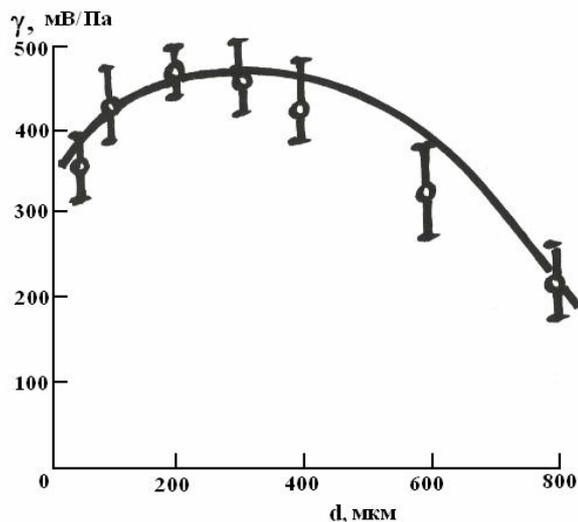


Рис.3. Зависимость чувствительности пьезокомпозитного преобразователя от толщины пьезоэлемента ПВДФ+ПП+ПКР-3М, $\Phi=60\%$.

Кроме влияния вышеуказанных характеристик, которые непосредственно связаны в пьезоэлементе, на АЧХ существенно влияет конструкционные параметры преобразователя и, в конечном итоге, делает функцию чувствительности преобразователя более многофакторной. Поэтому оптимизация формы и размеров пьезоэлемента и конструкционных параметров преобразователей в целом связана проведением многочисленных опытов для выявления влияния вышеуказанных факторов на АЧХ первичных преобразователей. Электромеханическое моделирование позволяет, в некоторой степени, сократить число опытов и технологических приемов для определения оптимальной конструкции и тем самым увеличить эффективность разработки пьезопреобразователей различных назначений.

В данной работе составлена электромеханическая модель, на основе которой оптимизированы конструкционные параметры композитных пьезопреобразователей.

Как известно из пьезотехники, при наличии механических напряжений на гранях некоторых кристаллов возникают заряды разного знака. Это явление носит название прямого пьезоэлектрического эффекта. Если к пьезоэлементу подать усиленные электрические сигналы, соответствующие звуковым волнам, то элемент будет работать как осциллятор, будет изменять свои геометрические размеры и преобразует электрический сигнал в акустический. Это явление носит название обратного пьезоэлектрического эффекта. В акустических системах применяются оба эффекта. Например, приемно-передающая антенна обнаружения подводных объектов работает на основе прямого и обратного пьезоэффектов.

Предположим, что мембрану, металлизированную с обеих сторон, имеющую форму цилиндра приложена синусоидальное напряжение U_0 и

под действием этого потенциала в элементе толщиной d возникает электрическое поле E_0 , определяемое как

$$E_0 = \frac{U_0 e^{j\omega t}}{d}$$

(1)

С дугой стороны, известно, что в условиях действия E_0 в кристалле возникнет электрическая сила F_0 , определяемая как

$$F_0 = qE_0, \quad (2)$$

где q - заряд, возникший на поверхности диэлектрика; E_0 - напряженность электрического поля.

Из уравнений (1) и (2) имеем

$$F_0 = \frac{qU_0 e^{j\omega t}}{d} \quad (3)$$

Под действием приложенной силы F_0 в кристалле возникают силы инерции F_1 , упругости F_2 и трения F_3 , где

$$\begin{aligned} F_1 &= m \frac{d^2 x}{dt^2} = m \ddot{x} \\ F_2 &= kx \\ F_3 &= r \frac{dx}{dt} = r \dot{x} \end{aligned} \quad (4)$$

По принципу Даламбера

$$F_1 + F_2 + F_3 = F_0 \quad (5)$$

Таким образом,

$$m \ddot{x} + r \dot{x} + kx = \frac{qU_0 e^{j\omega t}}{d} \quad (6)$$

Следует отметить, что решение уравнения (6) дает возможность определить характер колебания данной системы, его скорость и ускорения. Однако, следует отметить, что здесь не полностью учтена характеристика самого материала и эти характеристики учтены частично в таких параметрах как гибкость и масса мембраны. Правильность этого суждения вытекает из того, что гибкость материала

$$C \sim \frac{r_0^2 (1 - \sigma^2)}{Ed^3}, \quad (7)$$

где r - радиус мембраны; $\sigma = E \frac{\Delta l}{l_0}$ - модуль упругости; E - модуль Юнга; d - толщина мембраны; l_0 - начальная длина мембраны; Δl -

изменение длины мембраны под действием силы. Масса мембраны определяется как

$$m \sim d^2 \rho,$$

где ρ - плотность материала мембраны.

Любой простой колебательный контур, составленный из последовательно соединенных индуктивности L , емкости C и омического сопротивления R , при воздействии периодической э.д.с. $U_0 e^{j\omega t}$, описывается уравнением

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = U_m e^{j\omega t} \quad (8)$$

Вводя заряд конденсатора $q = \int idt$, имеем

$$L \ddot{q} + R \dot{q} + \frac{q}{C} = U_m e^{j\omega t} \quad (9)$$

Как видно из (6), уравнения движения механической системы идентичны с уравнением (9) и поэтому они взаимно заменены. При этом

1. сила F (Н) \rightarrow напряжение U (В);
2. скорость \dot{x} (м/сек) \rightarrow ток $i = \dot{q}$ (А);
3. смещение x (м) \rightarrow заряд q (Кл);
4. масса m (кг) \rightarrow индуктивность L (Гн);
5. гибкость c (м²/Н) \rightarrow емкость C (Ф);
6. механическое демпфирование (сопротивление) r (Н.сек/м) \rightarrow омическое сопротивление R (Ом).

Когда в системе стационарный колебательный

режим, тогда $i = \dot{q}$

$$\dot{q} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \sin(\omega t - \alpha), \quad (10)$$

где

$$\alpha = \arctg \frac{(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{R}.$$

Таким образом, установленная здесь аналогия имеет очень существенное практическое значение, дело в том, что аналитическое исследование сложных механических систем с несколькими степенями свободы представляет довольно трудоемкую задачу.

Представим расчет чувствительности пьезоэлектрических излучателей по эквивалентной схеме (рис. 4). Влияние параметров диафрагмы на частотную характеристику чувствительности пьезокомпозитного излучателя (телефона) удобно рассматривать с помощью эквивалентной электрической схемы телефона, построение которой основано на электромеханических аналогиях [4].

Расчет эквивалентных электрических схем акустических систем пьезокомпозитного телефона позволяет вносить в конструкцию последних ряд усовершенствований, обеспечивающих увеличения их средней чувствительности и уменьшение коэффициента неравномерности. Согласно определению чувствительности, величина последней пропорциональна отношению $\frac{U}{E_g}$.

Обозначим

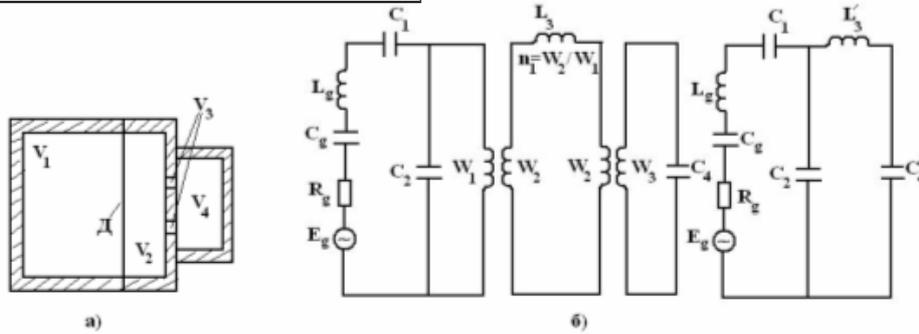


Рис. 4. а) Акустическая схема преобразователя; б) электрическая эквивалентная схема преобразователя.

Ввиду малости трения диафрагмы, ее пренебрегаем, тогда используя теорему о эквивалентном генераторе, определим ток J , протекающий через сопротивление Z_4

$$U_{xx} = \frac{E_g Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (11)$$

$$Z_{вн} = Z_3 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (12)$$

$$J = \frac{U_{xx}}{Z_{вн} + Z_4} = \frac{E_g Z_2}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \quad (13)$$

Из (13) получим

$$\frac{U}{E_g} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \quad (14)$$

$$C_g = 0,199 \frac{r_0^2 (1 - \sigma^2)}{E d^3}, \quad (15)$$

где r_0 - радиус пьезоэлемента; σ - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости материала пьезокомпозита; d - толщина пьезоэлемента.

$$L_g = 0,183 \cdot m_0,$$

где m_0 - масса пьезоэлемента;

$$C_1 = \frac{V_1}{\rho c^2 (0,306 S_0)^2}, \quad (16)$$

где V_1 - воздушный объем; ρ - плотность воздуха; c - скорость звука в воздухе; S_0 - площадь поперечного сечения диафрагмы.

$$C_2 = \frac{V_2}{\rho c^2 (0,306 S_0)^2}, \quad (17)$$

где V_2 - воздушный объем.

$$L'_3 = \frac{L_3}{n_1^2} \quad (18)$$

$$L_3 = \rho (l + 0,8 \sqrt{S'_2}) \cdot S'_2, \quad (19)$$

где l - высота отверстия на крышке; S'_2 - площадь отверстия на крышке. $S'_2 = 0,306 \cdot S_0$

$$C_4'' = n_1^2 \cdot n_2^2 \cdot C_4$$

$$C_4 = \frac{V_4}{\rho \cdot c^2 S_4^2},$$

где V_4 - объем искусственного уха ($V_4 = 6 \text{ см}^3$); S_4 - площадь поперечного сечения искусственного уха ($S_4 = 6 \text{ см}^2$).

$$n_2 = \frac{S_4}{S'_2}$$

$$S_0 = 3,14 \cdot \frac{3,6^2}{4} \cdot 10^{-4} = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$C_1 = \frac{V_1}{1,21 \cdot 343^2 \cdot (0,306 \cdot 1,02 \cdot 10^{-4})^2} = 72,108 \cdot V_1$$

$$C_2 = 72,108 \cdot V_2$$

$$C_4 = \frac{6 \cdot 10^{-6}}{1,21 \cdot 343^2 \cdot (6 \cdot 10^{-4})^2} = 117 \cdot 10^{-6} \Phi = 117_{\text{мк}\Phi}$$

$$n_1 = \frac{S'_2}{0,306 \cdot 1,02 \cdot 10^{-4}} = 3212,2 \cdot S'_2$$

$$n_2 = \frac{6 \cdot 10^{-6}}{S'_2}$$

$$L_g = 0,183 \cdot 547 \cdot 10^{-6} \quad \Gamma_n = 10^{-4} \quad \Gamma_n = 100 \text{ мк}\Gamma_n$$

$$C_g = 0,199 \cdot \frac{(1,8 \cdot 10^{-2})^2 \cdot (1,0 - 0,4)}{10^{10} \cdot (100 \cdot 10^{-6})^3} =$$

$$= 3,3 \cdot 10^{-3} \Phi = 3300 \text{ мк}\Phi$$

Таким образом, для того, чтобы определить максимум чувствительности системы нужно варьировать S'_2 (площадь отверстия на крышке), V_1 (объем за пьезоэлементом), V_2 (перед пьезоэлементом) и l (высота отверстия на крышке). Расчеты показали, что максимальную чувствительность можно получить при $V_1 = 6000 \text{ мм}^3$ и $V_2 = 550 \text{ м}^3$, при $S'_2 = 1 \text{ мм}^2$, $l = 1 \text{ мм}$, когда расстояние за пьезоэлементом $h_2 = 540 \text{ мкм}$ и перед пьезоэлементом $h_1 = 5,9 \text{ мм}$.

-
- [1]. Керимов М.К., Курбанов М.А., Оруджев А.О., Алиев Г.Г., Оруджев И.Н. Электретный и пьезоэлектрический эффекты в композитах полимер-пьезоэлектрик, кристаллизованных в условиях действия электрического разряда. Изв. НАН Азерб. Респуб., №5, 2003, с. 46-49.
- [2]. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. М., Энерго атомиздат., 1989, 272 с.
- [3]. Магеррамов А.М., Нуриев М.А. Микрофон на основе пьезокомпозиционных материалов. Ж. Физика, т.5, №2, 1999, с.46-48.
- [4]. Антоняк Ю.Т., Бассергисер М.Е. Расчет характеристик изгибного пьезоэлектрического преобразователя мембранного типа. Акустика, 1982, т.23, №3, с. 294-302.