

*А.Н.МОРОЗ*, канд. техн. наук, докторант, ХНТУСХ им.  
Петра Василенка, Харьков

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ МОЙКЕ ШЕРСТИ**

Наведені результати розрахунків чутливості п'єзоелектричного датчика циліндричної форми в залежності від співвідношення внутрішнього та зовнішнього діаметрів, а також частоти коливань.

Приводятся результаты расчетов чувствительности пьезоэлектрического датчика цилиндрической формы в зависимости от отношения внутреннего и внешнего диаметров, а также частоты колебаний.

**Вступлення.** Для создания малоэнергоёмких технологий и оборудования мойки шерсти на основе использования акустических и ультразвуковых колебаний, возбуждаемых в моющем растворе барки, необходимо знание физических процессов в объеме жидкости. Исследование этих физических процессов целесообразно проводить пьезоэлектрическими датчиками вследствие их хороших эксплуатационных характеристик, широких динамических и частотных диапазонов, малых размеров и высокой надёжности [1]. Важным условием успешного применения пьезоэлектрических датчиков является анализ их чувствительности в зависимости от габаритных размеров и частоты.

**Цель, задание исследования.** Определение чувствительности пьезоэлектрического датчика цилиндрической формы в зависимости от частоты и геометрических параметров, для исследования звукового давления в моющей среде при мойке шерсти.

**Теоретические положения.** Чувствительность датчика определяется напряжением холостого хода на выходе, отнесенного к воздействию на него в неискаженном свободном поле плоской волны звуковому давлению, и которая зависит от частоты. Наибольшую чувствительность имеют преобразователи, использующие радиальные колебания [2].

Для расчета колебаний цилиндрического пьезокерамического преобразователя, возбуждаемых электрическим генератором, приме-

няется теория основанная на гипотезах Киргофа-Лява. Движение цилиндрической оболочки пьезокерамического датчика с одной степенью свободы описывается дифференциальным уравнением [3]. Расчет характеристик пьезокерамического преобразователя также может быть осуществлен с помощью метода эквивалентной электрической цепи, учитывающей нагружение со стороны исследуемой среды [4]. Недостатком перечисленных методов является недостаточная точность расчетных характеристик.

Активная часть цилиндрического датчика моделируется полым пьезокерамическим круговым цилиндром с внешним и внутренним радиусами соответственно  $R_1$  и  $R_2$ , на боковых стенках которого размещены электроды. При воздействии поля падающих акустических волн на внешнюю поверхность пьезокерамического цилиндра, в силу пьезоэлектрического эффекта, на электродах возникает разность потенциалов, пропорциональная параметрам акустического поля. Формулирование краевой задачи расчета, математическая модель поперечных колебаний и аналитический анализ пьезоэлектрического датчика цилиндрической формы для измерения акустических параметров звукового поля в жидкости приведено в [5-7].

Результаты расчетов чувствительности пьезоэлектрического датчика цилиндрической формы по формуле [7]

$$S = \left| \frac{U}{P} \right| = \left| \frac{\Delta R F(\omega)}{e_{33} \left( \omega_3^2 \left( \omega^2 - \omega_4^2 \right) + F(\omega) \right)} \right| \quad (1)$$

показали, что в промежуточной области частот  $\left( 10 \text{ кГц} < \frac{\omega}{2\pi} < 50 \text{ кГц} \right)$  зависимость чувствительности от частоты

имеет резонансный характер. Расчеты проводились при следующих значениях параметров: внешний радиус цилиндра  $R_1 = 1,2 \cdot 10^{-3}$  (м), внутренний –  $R_2 = 0,8 \cdot 10^{-3}$  (м); упругие постоянные  $c_{11} = 13,9 \cdot 10^{10}$  (Н/м<sup>2</sup>),  $c_{13} = 7,43 \cdot 10^{10}$  (Н/м<sup>2</sup>); пьезоэлектрические постоянные  $e_{31} = -5,2$  (Кл/м<sup>2</sup>),  $e_{33} = 15,1$  (Кл/м<sup>2</sup>); диэлектрическая постоянная  $\epsilon_2 = 635 \epsilon_0$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  (Ф/м); плотность моющей жидкости  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 1 показана типичная зависимость чувствительности от частоты. Как видно, при  $f = 30$  кГц чувствительность достигает максимального значения  $S = 1,59$  (мкВ·м<sup>2</sup>/Н).

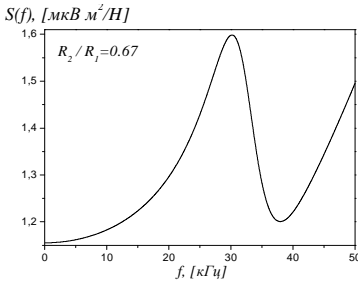


Рис. 1.

Такое резонансное поведение чувствительности обусловлено тем, что при отсутствии потерь в материале пьезокерамического цилиндра, знаменатель в формуле (1) может обращаться в нуль при некоторых значениях частоты. Эти значения частоты являются корнями уравнения

$$\omega_3^2 (\omega^2 - \omega_4^2) + F(\omega) = 0 \quad (2)$$

Корни этого уравнения могут быть определены в явном виде. Действительно, преобразуем (2) к следующему виду

$$\omega^4 + A\omega^2 + B = 0, \quad (3)$$

где

$$A = \omega_2^2 \left( \frac{R_1}{R_2} \right) - \omega_1^2 \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} + \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right) + \omega_3^2 \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^{-1};$$

$$B = \omega_1^2 \omega_2^2 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 - \omega_3^2 \omega_4^2 \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^{-1}.$$

Из (3) имеем

$$\omega_{\pm} = \sqrt{\frac{-A \pm \sqrt{A^2 - 4B}}{2}}. \quad (4)$$

При отсутствии потерь в материале датчика выполняются неравенства:

$$A^2 > 4B, \quad A < 0,$$

и, следовательно, уравнение (3) имеет вещественные корни  $\omega_{\pm}$ . В этих условиях при  $\omega = \omega_{\pm}$  чувствительность обращается в бесконечность. Однако, учет потерь в материале датчика приводит к тому, что корни уравнения (3) становятся комплексными. Поэтому при вещественных частотах знаменатель в выражении (1) не может обратиться в нуль. При этом чувствительность в окрестности значений  $\omega = \text{Re } \omega_{\pm}$  может достигать экстремальных значений. Так при указанных выше значениях параметров датчика и учете механических потерь по формуле [8]

$$\bar{c}_{11} = c_{11} (1 + i\tau); \quad \bar{c}_{13} = c_{13} (1 + i\tau),$$

где  $\tau \cong 10^{-2}$ , чувствительность датчика достигает максимального значения  $S \cong 1,59 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^2/\text{Н}$  при частоте  $f = \text{Re } \omega_+ / 2\pi \cong 30 \text{ кГц}$  (рис. 1).

Рассмотрим влияние на чувствительность датчика геометрического параметра  $\eta = R_2 / R_1$  – отношение внутреннего радиуса пьезокерамического цилиндра к внешнему. На рис. 2 представлены результаты расчетов зависимости влияния геометрического параметра  $\eta = R_2 / R_1$  датчика на его чувствительность в диапазоне частот от 0 до 10 кГц. Зависимости влияния геометрического параметра  $\eta = R_2 / R_1$  датчика на его чувствительность в диапазоне частот от 10 до 50 кГц представлены на рис. 3.

Необходимо отметить, что с увеличением параметра  $\eta = R_2 / R_1 \rightarrow 1$  чувствительность датчика стремится к нулю. Кроме того, в диапазоне частот  $f \leq 10 \text{ кГц}$  для чувствительности характерно следующее: при фиксированном значении частоты чувствительность практически линейно зависит от параметра  $\eta = R_2 / R_1$ . Чувствительность датчика при частотах 1 и 10 кГц показана на рис. 4.

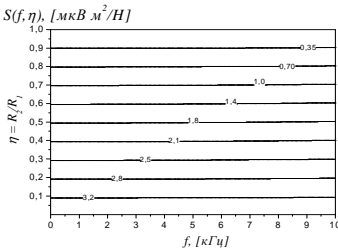


Рис. 2.

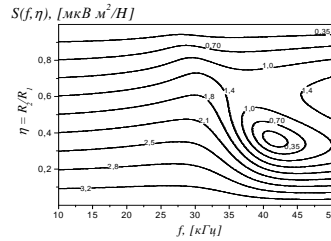


Рис. 3.

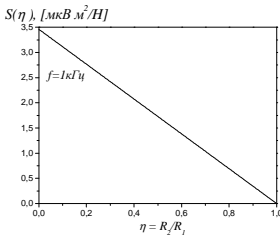


Рис. 4.

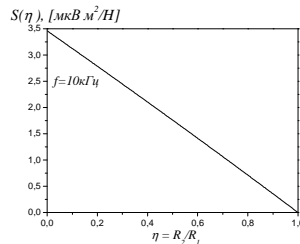


Рис. 5.

В области высоких частот  $f > 10$  кГц отмеченная выше закономерность в поведении чувствительности нарушается. На рис. 3 изображены линии равных значений чувствительности как функции частоты и геометрического параметра  $\eta = R_2 / R_1$ . Как легко заметить в диапазоне частот  $20 \text{ кГц} \leq f \leq 50 \text{ кГц}$  чувствительность как функция параметра  $\eta = R_2 / R_1$  ведет себя резонансным образом.

**Выводы.** Исследование параметров чувствительности полого пьезоэлектрического датчика цилиндрической формы показывают, что при частоте  $f \leq 10$  кГц чувствительность датчика практически линейно зависит от параметра  $\eta = R_2 / R_1$ . В области частот  $f > 10$  кГц линейная зависимость чувствительности датчика нарушается и в диапазоне частот  $20 \text{ кГц} \leq f \leq 50 \text{ кГц}$  чувствительность как функция параметра  $\eta = R_2 / R_1$  ведет себя резонансным образом.

**Список источников информации:** 1. Справочник по гидроакустике / А.П.Евтютов, А.Е.Колесников, Е.А.Коретин и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1988. – 552 с. 2. Шарпов В.М. Пьезокерамические преобразователи физических величин / Шарпов В.М., Мусиенко М.П., Шарпова Е.В. – Черкассы: ЧГТУ, 2005. – 631 с. 3. Семенов А.А. Теория электромагнитных волн / А.А.Семенов – М.: Изд. МГУ, 1968. – 317 с. 4. Бежаниян В.А., Улитко А.Ф. Векторные краевые задачи электроупругости для цилиндров из пьезоэлектрических материалов / Бежаниян В.А., Улитко А.Ф. – Изв. АН Арм. ССР. Сер. Механика. – 1984. – № 6. – С. 16-28. 5. Мороз А.Н. Постановка краевой задачи расчета пьезоэлектрического датчика цилиндрической формы для измерения акустических параметров звукового поля в жидкости // Вісник НТУ "ХПІ". Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №44. С. 95-102. 6. Мороз А.Н. Математическая модель поперечных колебаний пьезоэлектрического датчика цилиндрической формы // Вісник НТУ "ХПІ". Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №7. С.73-82. 7. Мороз А.Н. Аналитический анализ чувствительности пьезоэлектрического датчика цилиндрической формы в технологических процессах связанных с акустическими колебаниями в водной среде // Вісник НТУ "ХПІ". Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №29. С. 106-113. 8. Гринченко В.Т. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость / Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А.; Отв. ред. А.Н. Гузь: АН УССР, Ин-т механики. – Киев: Наукова думка, 1989. – 280 с.



**Мороз Олександр Миколайович**, доцент, канд. техн. наук. Закінчив Харківський інститут механізації і електрифікації сільського господарства в 1984 р. за фахом інженер-електрик. Навчався в аспірантурі Московського гідромеліоративного інституту в 1987...1990 р.р., там же захистив дисертацію кандидата технічних наук в 1991р. Директор навчально-наукового інституту Енергетики і комп'ютерних технологій Харківського національного технічного університету сільського господарства з 2009 р. Наукові інтереси пов'язані з процесами первинної обробки вонни з використанням акустичних коливань та електромагнітних хвиль надвисокої частоти.

*Поступила в редколлегию 20.09.2010*

**ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПІ". 2010. № 36**