

**В. М. Шарапов<sup>1</sup>**, д.т.н., професор,  
**О. Н. Петрищев<sup>2</sup>**, д.т.н., професор,  
**К. В. Базило<sup>1</sup>**, к.т.н.

<sup>1</sup>Черкасский государственный технологический университет  
б-р Шевченко, 460, г. Черкассы, 18006, Украина  
[v\\_sharapov@rambler.ru](mailto:v_sharapov@rambler.ru)

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
проспект Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК С АКУСТИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

*В статье описан пьезоэлектрический датчик с акустическим резонатором. Построена эквивалентная электрическая схема электроакустической системы с пьезоэлектрическим датчиком при помощи метода электромеханических аналогий. Согласно эквивалентной электрической схеме было проведено моделирование амплитудно-частотных характеристик пьезоэлектрического датчика в программе Micro-Cap. Представлены результаты сравнения характеристик экспериментального образца и эквивалентной схемы. Применение акустического резонатора позволяет повысить уровень выходного сигнала пьезоэлектрического датчика на заданной частоте.*

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический датчик, акустический резонатор, амплитудно-частотная характеристика, эквивалентная схема.

Пьезоэлектрические преобразователи широко используются в электроакустике, гидроакустике, в ультразвуковой, медицинской, измерительной технике, в сканирующих зондовых наномикроскопах, пьезодвигателях, в других областях науки и техники [1–4].

Одной из главных характеристик пьезоэлектрических преобразователей является полоса рабочих частот. Несмотря на то, что преимущественно стараются достигнуть ее расширения, находят применение также и узкополосные пьезоэлектрические преобразователи. В частности, областью применения узкополосных пьезоэлектрических преобразователей являются системы охранной сигнализации, например, детекторы разрушения стекла, ударов [5].

Датчики разрушения стекла реагируют на колебания с частотой, которая соответствует частоте колебаний, возникающих при разрушении стекла. Наиболее совершенные модели способны анализировать спектр звуковых шумов в помещении. Если спектр шума содержит составляющую, совпадающую со спектром повреждаемого стекла, то происходит срабатывание датчика.

В качестве датчиков разрушения стекла наиболее часто используются пьезоэлектрические датчики [5].

Узкополосные пьезоэлектрические датчики могут применяться также в помещениях с повышенным уровнем шума (аэропорты, вокзалы и т. п.).

В работах [6, 7] описаны технологии синтеза пьезоэлектрических преобразователей. Эти технологии позволяют создавать преобразователи с необходимыми характеристиками.

Среди описанных технологий особый интерес представляет технология добавочных элементов, так как в этом случае изменение характеристик преобразователя осуществляется за счет внешних для пьезоэлемента цепей. Суть этой технологии заключается в том, что к пьезоэлементу присоединяют дополнительные колебательные системы – электрические, механические, электромеханические или акустические [5].

**Целью данной работы** является повышение чувствительности узкополосных пьезоэлектрических датчиков разрушения стекла.

Для достижения поставленной цели предложено использовать пьезоэлектрический датчик с акустическим резонатором (рис. 1).

При анализе процессов, происходящих в сложных механических системах, используется метод электромеханических аналогий. Он позволяет сводить механические системы к электрическим. Согласно этому методу давление  $P$  считают аналогом напряжения, ско-

рость колебаний  $v$  – аналогом плотности тока, а объемную скорость колебаний  $V_a = vS$  (где  $S$  – поперечное сечение звукопровода) – аналогом тока [8, 9].

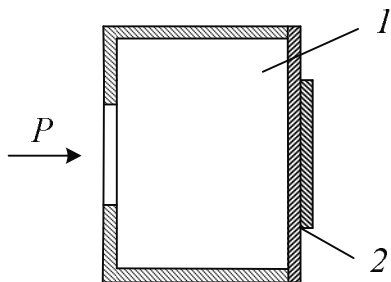


Рис. 1. Пьезоэлектрический датчик с акустическим резонатором:  
1 – акустический резонатор;  
2 – пьезоэлектрический датчик

Входное звуковое давление  $P$  воздействует на массу, находящуюся в отверстии  $M_1$ . Кроме того, это отверстие представляет собой активное сопротивление  $R_1$  (трение о стенки отверстия, вязкость воздуха, излучение и т.д.). Масса воздуха в отверстии практически несжимаема, поэтому сила  $F$  ( $F = PS$ , где  $S$  – площадь отверстия, а  $P$  – звуковое давление) полностью воздействует и на объем, находящийся за ним, т.е. на гибкость  $C_V$  объема воздуха резонатора. Звуковое давление, создающееся в объеме резонатора, воздействует на пьезоэлектрический датчик (БПЭ), который представляет собой узел сопротивлений из  $M_\delta$ ,  $R_\delta$  и  $C_\delta$  [1].

Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического датчика с акустическим резонатором представлена на рис. 2.

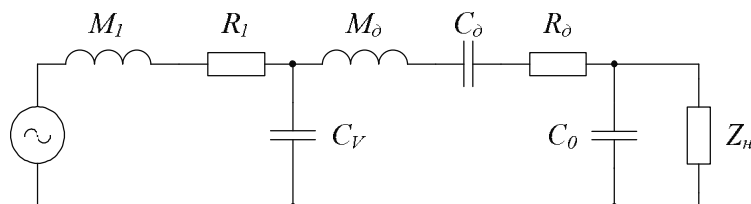


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема электроакустической системы с пьезоэлектрическим датчиком

Схема (рис. 2) содержит следующие элементы [10]:

$C_0$  – межэлектродная емкость пьезоэлектрического датчика;

$M_\delta$  – акустическая масса биморфной диафрагмы:

$$M_\delta = 2\pi \int_0^{R_2} \rho_A \left( \frac{w(r)}{\Delta V} \Big|_{U_\infty=0} \right)^2 r dr + \frac{8\rho_0}{3\pi^2 R_2^2}, \quad (1)$$

где  $\rho_A$  – поверхностная плотность пьезоэлектрической биморфной пластины;

$C_\delta$  – акустическая гибкость биморфной диафрагмы:

$$C_\delta = \frac{\int_0^{R_2} w(r) \Big|_{U_\infty=0} 2\pi r dr}{P}. \quad (2)$$

Сопротивление биморфной диафрагмы  $R_\delta$ :

$$R_\delta = 2\zeta \sqrt{\frac{M_\delta}{C_\delta}}, \quad (3)$$

где  $\zeta$  – коэффициент затухания.

$M_1$  – акустическая масса:

$$M_1 = \frac{\rho_0(l + \Delta l)}{\pi r^2}, \quad (4)$$

где  $l$  и  $r$  – длина и радиус отверстия;  $\rho_0$  – плотность среды;  $\Delta l$  – поправка, учитывающая коррекцию на захват воздуха вблизи отверстия;

$$\Delta l = 0,85r \cdot \left( 1 - 0,7 \frac{r}{R} \right) + 0,85r, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус объема  $V$ .

$C_V$  – акустическая гибкость:

$$C_V = \frac{V}{\rho_0 c_0^2}, \quad (6)$$

где  $V = \pi R^2 L$ ;  $L$  – глубина объема;  $c_0$  – скорость звука в среде.

Сопротивление отверстия  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{l}{r} \cdot \frac{\sqrt{2\mu\rho_0\omega}}{\pi r^2} + 2 \frac{\sqrt{2\mu\rho_0\omega}}{\pi r^2} + \frac{\rho_0 c_0}{\pi r^2} \left[ 1 - \frac{2J_1(2kr)}{2kr} \right], \quad (7)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха;  $J_1(x)$  – функция Бесселя первого рода. Сопротивление отверстия  $R_1$  включает в себя несколько составляющих. Первое слагаемое представляет собой вязкие потери в пограничном слое стенок отверстия, которое получено при условии колебания потока через отверстие за счет акустического возбуждения гидродинамически несжимаемого вязкого потока; второе слагаемое – вязкие потери на концах отверстия

(также относится к коррекции сопротивления концов отверстия); третье слагаемое – потери на излучение на внешнем конце отверстия. На низких частотах

$$R_1 \approx \frac{\rho_0 c_0 k^2}{2\pi}. \quad (8)$$

Как видно из рис. 2, использование акустического резонатора позволяет создать на входе пьезоэлектрического датчика последовательный колебательный контур. Регулируя длину резонатора, можно добиться усиления сигнала на необходимой частоте.

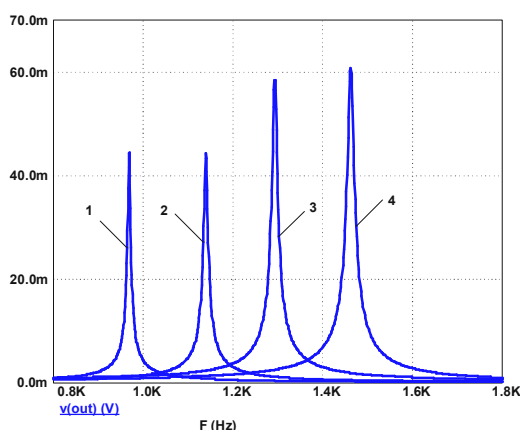
Для быстрой оценки характеристик пьезоэлектрических трансформаторов согласно эквивалентной электрической схеме (рис. 2) была построена схемотехническая модель пьезоэлектрического датчика в программе Micro-Cap, результаты моделирования которой представлены на рис. 3.

Для подтверждения правильности построения схемотехнической модели были экспериментально определены амплитудно-частотные характеристики пьезоэлектрического датчика с акустическим резонатором (рис. 4, табл. 1). Для экспериментальных исследований использовался пьезоэлектрический биморфный элемент от преобразователя ЗП-19 и четвертьволновой резонатор длиной  $L$ . Входное давление создавалось при помощи виброакустической камеры, на которую подавалось напряжение 1 В.

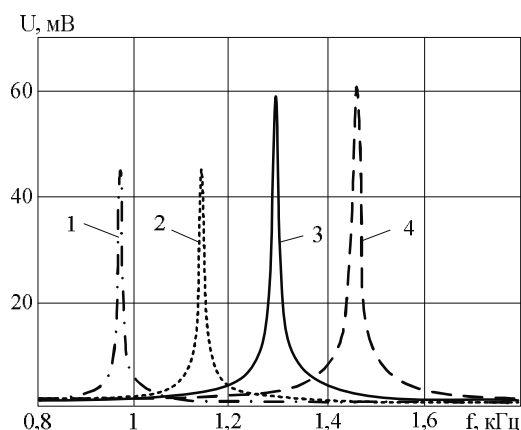
Длина четвертьволнового резонатора подбирается согласно:

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4 \cdot f}, \quad (9)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $c$  – скорость звука;  $f$  – частота колебаний.



**Рис. 3. Результаты моделирования амплитудно-частотных характеристик в программе Micro-Cap**



**Рис. 4. АЧХ пьезоэлектрического датчика с акустическим резонатором длиной  $L$ :**  
1 –  $L = 75$  мм; 2 –  $L = 51$  мм;  
3 –  $L = 42$  мм; 4 –  $L = 35$  мм

Таблица 1

**АЧХ пьезоэлектрического датчика с акустическим резонатором длиной  $L$**

№	$P$ , дБ	$f$ , Гц	$L$ , мм	$U$ , мВ	
				без резонатора	с резонатором
1	103,5	970	75	6,4	44
2	99,5	1140	51	6,2	44
3	100	1290	42	9,6	58
4	97,5	1460	35	13	61

Как видно из рис. 3, 4, амплитудно-частотные характеристики экспериментального образца практически совпадают с характеристиками построенной модели (эквивалентной электрической схемы).

Из рис. 4 и табл. 1 следует, что применение акустического резонатора позволяет повысить чувствительность пьезоэлектрического датчика на заданной частоте.

#### Выводы:

1. Построена эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического датчика с акустическим резонатором.

2. Применение акустического резонатора позволяет повысить чувствительность пьезоэлектрического датчика на заданной частоте.

## Список литературы

## References

1. Sharapov, V. (2011) Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 498 p.
2. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шаропова Е. В. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
3. Sharapov, V., Sotula, Zh. and Kunitskaya, L. (2013) Piezoelectric electroacoustic transducers. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 240 p.
4. Шарапов В. М. Электроакустические преобразователи / [В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ж. В. Сотула, Л. Г. Куницкая]. – М. : Техносфера, 2013. – 280 с.
5. Датчики : справ. пособие / [В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой и др.] ; под общ. ред. В. М. Шаропова, Е. С. Полищука. – М. : Техносфера, 2012. – 624 с.
6. Шарапов В. М. Пьезокерамические преобразователи. Новые технологии проектирования / В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула // Электроника (Москва). – 2012. – № 5. – С. 96–102.
7. Применение объемных резонаторов в пьезоэлектрических электроакустических преобразователях / В. М. Шарапов, А. М. Салагор, Ж. В. Сотула, В. М. Заика // Современная электроника. – 2013. – № 5. – С. 58–60.
8. Акустика : справочник / [А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В. И. Шоров] ; под ред. М. А. Сапожкова. – М. : Радио и связь, 1989. – 336 с.
9. Ольсон Г. Динамические аналогии / Г. Ольсон. – М. : Гос. изд-во иностр. лит., 1947. – 224 с.
10. Liu, F., Horowitz, S., Nishida, T. et al. (2007) A multiple degree of freedom electromechanical Helmholtz resonator. *J. Acoust. Soc. Am.*, 122 (1), pp. 291–301.
11. Островский Л. А. Основы общей теории электроизмерительных устройств / Л. А. Островский. – Л. : Энергия, 1971. – 544 с.
1. Sharapov, V. (2011) Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 498 p.
2. Sharapov, V. M., Musienko, M. P. and Sharapova, E. V. (2006) Piezoelectric sensors. Moscow: Technosphera, 632 p. [in Russian].
3. Sharapov, V., Sotula, Zh. and Kunitskaya, L. (2013) Piezoelectric electroacoustic transducers. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 240 p.
4. Sharapov, V. M., Minaev, I. G., Sotula, Zh. V. and Kunitskaya, L. G. (2013) Electroacoustic transducers. Moscow: Technosphera, 280 p. [in Russian].
5. Sharapov, V. M., Polischuk, E. S., Koshevoi, N. D. et al. (2012) Sensors: handbook In: V. M. Sharapov, E. S. Polischuk (Eds.). Moscow: Technosphera, 624 p. [in Russian].
6. Sharapov, V. M. and Sotula, Zh. V. (2012) Piezoceramic transducers. New design technologies. *Elektronika* (Moscow), (5), pp. 96–102 [in Russian].
7. Sharapov, V. M., Salagor, A. M., Sotula, Zh. V. and Zaika, V. M. (2013) The use of cavity resonators in piezoelectric electroacoustic transducers. *Sovremennaya elektronika*, (5), pp. 58–60 [in Russian].
8. Efimov, A. P., Nikonov, A. V., Sapozhkov, M. A. and Shorov, V. I. (1989) Acoustics: handbook. Moscow: Radio i svyaz', 336 p. [in Russian].
9. Olson, H. (1947) Dynamic analogies. Moscow: Gos. Izd-vo inostr. lit., 224 p. [in Russian].
10. Liu, F., Horowitz, S., Nishida, T. et al. (2007) A multiple degree of freedom electromechanical Helmholtz resonator. *J. Acoust. Soc. Am.*, 122 (1), pp. 291–301.
11. Ostrovsky, L. A. (1971) Fundamentals of general theory of electrical measuring devices. Leningrad: Energiya, 544 p. [in Russian].

V. M. Sharapov<sup>1</sup>, Dr.Tech.Sc., professor,  
O. N. Petrishchev<sup>2</sup>, Dr.Tech.Sc., professor,  
K. V. Bazilo<sup>1</sup>, Ph.D.

<sup>1</sup>Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd., 460, Cherkasy, 18006, Ukraine  
[v\\_sharapov@rambler.ru](mailto:v_sharapov@rambler.ru)

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"  
Peremogy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

## PIEZOELECTRIC SENSOR WITH ACOUSTIC RESONATOR

## PIEZOELECTRIC SENSOR WITH ACOUSTIC RESONATOR

*The work is devoted to actual problems of piezoelectric sensors improvement. Piezoelectric transducers are widely used in electro-acoustic, hydroacoustic, ultrasonic, medical and measuring techniques and security systems. One of the main characteristics of the piezoelectric transducers is operation frequency band. Despite the fact that it is used to be expanded, narrowband piezoelectric transducers also can be used. In particular, the fields of application of piezoelectric transducers are narrowband alarm systems, for example, glass breakage detectors. The change of piezoelectric sensors characteristics is possible due to external circuits for piezoelectric element – electric, mechanical or acoustic ones. This article describes piezoelectric sensor with acoustic resonator. Equivalent electric circuit of electro-acoustic system with piezoelectric sensor with the help of electromechanical analogies method is built. The use of the offered equivalent circuit allows with the application of programs to assess characteristics, to predict the parameters and operation mode of piezoelectric transformers. According to equivalent circuit the amplitude-frequency characteristics of piezoelectric sensor are simulated in Micro-Cap program. The use of acoustic resonator can increase the level of piezoelectric sensor output signal on the given frequency. Experimental results of piezoelectric sensor amplitude-frequency characteristics without and with acoustic resonator of varying lengths are given. The results of the research are obtained by the simulation and compared with real characteristics of experimental sample. Received information can be used in electro-acoustic transducers designing.*

**Keywords:** piezoelectric sensor, acoustic resonator, amplitude-frequency characteristic, equivalent circuit.

*Стаття надійшла до редакції 01.11.2014.*

*Рецензенти:* Ващенко В. А., д.т.н., професор,  
Мусієнко М. П., д.т.н., професор.