

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ДОБАВОЧНЫМИ КОНТУРАМИ**Шарапов В. М., д.т.н., профессор,****Базило К. В., к.т.н.**Черкасский государственный технологический университет
18006, бульв. Шевченко, 460, г. Черкассы, Украина, v_sharapov@rambler.ru

Анотація. У статті побудовано математичні моделі та проведено моделювання електроакустичних перетворювачів з додатковими електричними коливальними контурами. Використання запропонованих математичних моделей дозволяє за допомогою прикладних програм проводити оцінку характеристик, прогнозувати параметри і режим роботи п'єзоелектричних перетворювачів. Представлено результати дослідження, отримані за допомогою математичного моделювання, а також їх порівняння з реальними характеристиками експериментального зразка.

Ключові слова: п'єзоелектричний перетворювач, коливальний контур, амплітудно-частотна характеристика, математична модель.

THE CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODEL OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCER WITH ADDITIONAL CIRCUITS**Sharapov V. M., Dr.Tech.Sc., professor,****Bazilo K. V., Ph.D.**Cherkasy State Technological University
18006, Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, Ukraine, v_sharapov@rambler.ru

Abstract. In the article mathematical models are constructed and the simulation of electroacoustic transducers with additional electric oscillatory circuits is carried out. The use of offered mathematical models allows with the help of application programs to assess characteristics, predict parameters and the mode of piezoelectric transducers. The results of the research obtained by mathematical modeling and also their comparison with real characteristics of experimental sample are set out.

Keywords: piezoelectric transducer, oscillatory circuit, amplitude-frequency response, mathematical model.

Устройства, преобразующие электрический сигнал в акустический, называют электроакустическими преобразователями (ЭАП) [1, 2]. Наиболее часто в качестве ЭАП используют пьезоэлектрические преобразователи (ПЭАП) [3, 4].

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

Особое место пьезоэлектрические преобразователи занимают в гидроакустике, являясь, по существу, глазами и ушами надводных и подводных кораблей [5].

В работах [6, 7] описаны технологии синтеза пьезоэлектрических преобразователей. Эти методы 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 электрические и механические элементы, которые изменяют характеристики преобразователя [6, 7].

Для этого к пьезоэлементу преобразователя присоединяются дополнительные колебательные системы – электрические, механи-

ческие, электромеханические и акустические [9–12].

Аналитические выражения для расчета амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) таких колебательных систем отсутствуют, поэтому определение АЧХ зачастую проводят экспериментальным путем, что не всегда удобно и приводит к увеличению временного фактора при проектировании пьезоэлектрических преобразователей.

Поэтому **целью** данной работы является построение математической модели пьезоэлектрического преобразователя с добавочными колебательными контурами. Использование таких моделей позволяет при помощи прикладных программ производить оценку характеристик и прогнозирование параметров и режимов работы пьезоэлектрических преобразователей.

Схемы некоторых вариантов преобразователей с добавочными электрическими контурами показаны на рис. 1. Добавочные контуры в этом случае создаются с помощью добавочных индуктивностей L и межэлектродных емкостей пьезоэлемента – одной (рис. 1, а) или нескольких (рис. 1, б).

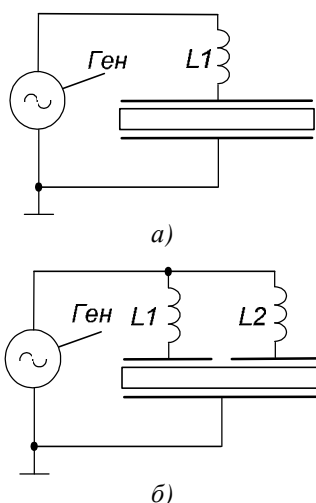


Рис. 1. Схемы ПЭАП с дополнительными колебательными контурами

Как известно [1, 2], пьезоэлемент представляет собой электромеханическую колебательную систему, эквивалентная электрическая схема которой изображена на рис. 2 [3, 4].

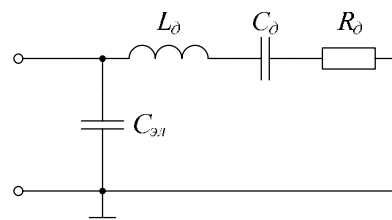


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлемента

На этой схеме $C_{эл}$ – емкость между электродами пьезоэлемента, L_0 , C_0 , R – динамические индуктивность и емкость и активные потери в пьезоэлементе.

Если присоединить ко входу пьезоэлемента индуктивность $L_{доб}$, чтобы эта индуктивность и емкость между электродами $C_{эл}$ образовали последовательный колебательный контур $L_{доб}C_{эл}$, резонансную частоту его можно определить по известной формуле (рис. 3) [6, 7]

$$f_{доб} = \frac{1}{2p\sqrt{L_{доб}C_{эл}}} \quad (1)$$

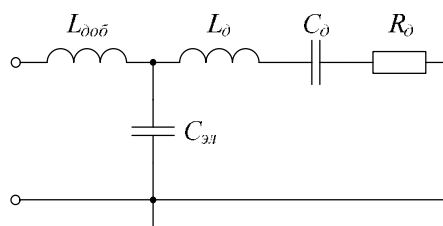


Рис. 3. Эквивалентная схема пьезоэлемента с дополнительной индуктивностью

Собственную резонансную частоту пьезоэлемента можно определить как

$$f_{пэ} = \frac{1}{2p\sqrt{L_0C_0}} \quad (2)$$

Кроме того, возникает резонанс на частоте

$$f = \frac{1}{2p\sqrt{(L_{доб} + L_0)C_0}} \quad (3)$$

В зависимости от величин $C_{эл}$ и $L_{доб}$ возможны три случая:

$$f_{доб} = f_{пэ}; f_{доб} < f_{пэ}; f_{доб} > f_{пэ} \quad (4)$$

Если к пьезоэлементу присоединить второй контур, такая система, как известно,

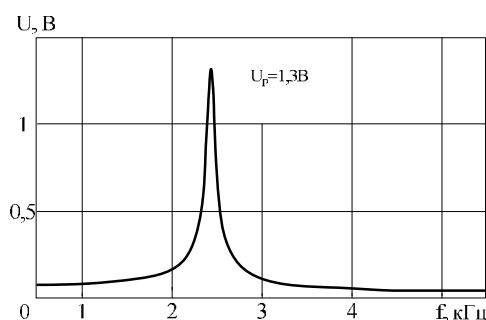
називається зв'язаним коливальним контуром [13].

Обычно один коливальний контур настраивается на частоту електромеханических коливаний пьезоелемента (выражение (2)), что обеспечивает повышение уровня выходного сигнала на этой частоте.

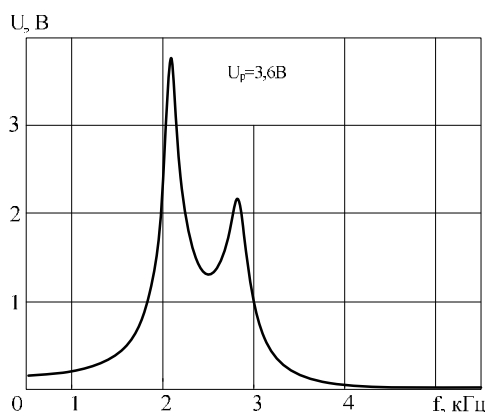
Второй контур настраивают на более низкую частоту, что обеспечивает расширение полосы пропускания.

Амплитудно-частотная характеристика електроакустического преобразователя на основе биморфного элемента от преобразователя ЗП-19 производства ОАО «Аврора» (Волгоград) и биморфного элемента с одним дополнительным контуром показана на рис. 4.

Биморфный элемент состоит из пластины из стали 40X Ø 32 и толщиной 0,15 мм. К пластине приклеен эпоксидным компаундом пьезоэлемент Ø 23 и толщиной 0,2 мм. Преобразователь закреплен в корпусе из ударопрочного полистирола. На вход пьезоэлектрического преобразователя (ПП) подавалось напряжение от генератора ГЗ-109.



а)



б)

Рис. 4. АЧХ преобразователя без дополнительного контура (а) и с контуром (б)

Как видно из рис. 4, применение дополнительного контура позволило повысить уровень выходного сигнала и расширить полосу частот.

Выходное напряжение пьезопреобразователя равно:

$$U_{out} = \frac{E \cdot n \cdot X_{in} \cdot X_{out}}{(X_{in} + Z_d + X_{out}) \cdot (R_g + X_1 + X_{in}) - (X_{in})^2}, \quad (5)$$

где

$$Z_d = j\omega L_d + \frac{1}{j\omega C_d} + R_d; X_{in} = \frac{1}{j\omega C_{in}}; X_{out} = \frac{1}{j\omega C_{out}}; X_1 = j\omega L_1; \omega = 2\pi f;$$

L_d, C_d, R_d являются динамическими электрическими параметрами пьезоэлектрического преобразователя, n – коэффициент передачи идеального трансформатора.

Согласно (5) проведено моделирование амплитудно-частотной характеристики пьезоэлектрического преобразователя с одним дополнительным контуром в программе Mathcad (рис. 5).

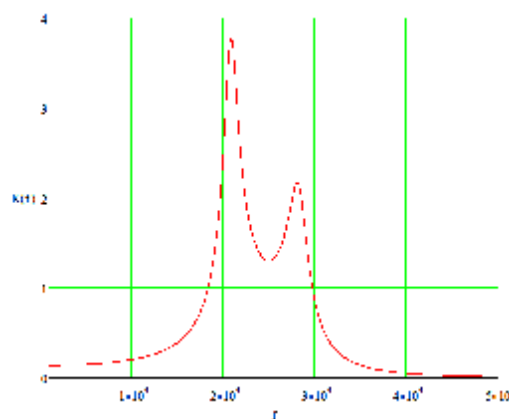


Рис. 5. Результаты моделирования АЧХ в программе Mathcad

АЧХ того же преобразователя с двумя дополнительными контурами показана на рис. 6.

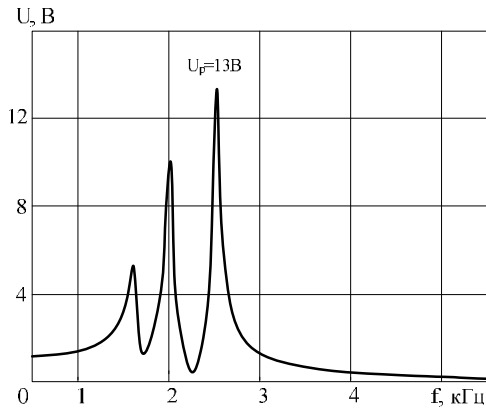


Рис. 6. АЧХ преобразователей с двумя дополнительными контурами

Выходное напряжение пьезопреобразователя с двумя контурами равно:

$$I_1 = \frac{E \cdot \left[\frac{X_{out} + Z_{d2}}{X_{out}} + \frac{X_M}{X_{in}} - \frac{(X_{in} + Z_{d1}) \cdot [(X_2 + R_2 + X_{out}) \cdot (X_{out} + Z_{d2}) - X_{out}^2]}{X_{in} \cdot (X_2 + R_2 + X_{out}) \cdot X_M} \right] - \left[\frac{(X_2 + R_2 + X_{out}) \cdot (X_{out} + Z_{d2}) - X_{out}^2}{(X_2 + R_2 + X_{out}) \cdot (X_{out})} \right]}{\left[\frac{X_{in}^2 - (X_1 + R_1 + X_{in}) \cdot (X_{in} + Z_{d1})}{X_{in} \cdot (X_2 + R_2 + X_{out}) \cdot X_M} \right] \cdot \left[\frac{(X_2 + R_2 + X_{out}) \cdot (X_{out} + Z_{d2}) - X_{out}^2}{X_{in}} \right] + \frac{(X_1 + R_1 + X_{in}) \cdot X_M}{X_{in}}};$$

$$U_{out} = (I_1 - I_2) \cdot X_{in}, \quad I_2 = \frac{I_1 \cdot (X_1 + R_1 + X_{in}) - E}{X_{in}}; \quad (6)$$

где

$$Z_{d1} = j\omega L_{d1} + \frac{1}{j\omega C_{d1}} + R_{d1};$$

$$Z_{d2} = j\omega L_{d2} + \frac{1}{j\omega C_{d2}} + R_{d2};$$

$$X_{in} = \frac{1}{j\omega C_{in}}; \quad X_{out} = \frac{1}{j\omega C_{out}}; \quad X_1 = j\omega L_1;$$

$$X_2 = j\omega L_2; \quad \omega = 2\pi f;$$

L_d, C_d, R_d являются динамическими электрическими параметрами пьезоэлектрического преобразователя.

Согласно (6) проведено моделирование амплитудно-частотной характеристики пьезоэлектрического преобразователя с двумя дополнительными контурами в программе Mathcad (рис. 7).

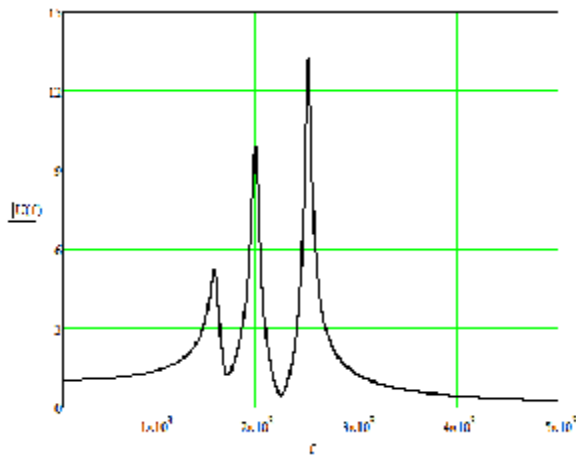


Рис. 7. Результаты моделирования АЧХ

в программе Mathcad

Как видно из рис. 4–7, амплитудно-частотные характеристики построенных математических моделей практически совпадают с характеристиками экспериментального образца.

Выводы:

1. Построены математические модели пьезоэлектрического преобразователя с добавочными колебательными контурами.
2. Использование предложенных математических моделей позволяет при помощи прикладных программ производить оценку характеристик, прогнозировать параметры и режим работы пьезоэлектрических преобразователей.

Список литературы

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., Шарапова Е. В. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
3. Sharapov, V., Sotula, Zh., Kunitskaya, L. (2013) Piezoelectric electroacoustic transducers, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 240 p.
4. Электроакустические преобразователи / Шарапов В.М., Минаев И. Г., Соту-

- ла Ж. В., Куницкая Л. Г. – М. : Техносфера, 2013. – 280 с.
5. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под ред. И. Н. Ермолова. – М. : Машиностроение, 1986. – 280 с.
 6. Шарапов В. М. Пьезокерамические преобразователи. Новые технологии проектирования / В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула // *Электроника (Москва)*. – 2012. – № 5. – С. 96–102.
 7. Шарапов В. М. Изменение параметров пьезоэлектрических преобразователей с помощью добавочных элементов / В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула, Л. Г. Куницкая, А. С. Ткаченко // *Современная электроника (Москва)*. – 2013. – № 3. – С. 56–57.
 8. Sharapov V. M. Characteristics improvement of the piezoelectric electro-acoustic transducers with additional contours / V. M. Sharapov, Zh. V. Sotula, K. V. Bazilo, L. G. Kunitskaya, A. M. Salagor // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2013. – № 2. – С. 65–70.
 9. Шарапов В. М. Исследование пьезоэлектрических преобразователей с добавочными колебательными контурами / В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула, К. В. Базило, В. Е. Снитюк // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2013. – № 1. – С. 35–38.
 10. Пат. 56932 Україна. Электроакустичний перетворювач / Шарапов В. М. та ін. – № 201012464; заявл. 22.10.10; опубл. 25.01.11, Бюл. № 2.
 11. Пат. 56939 Україна. Электроакустичний перетворювач / Шарапов В. М. та ін. – № 201012498; заявл. 22.10.10; опубл. 25.01.11, Бюл. № 2.
 12. Пат. 60924 Україна. Спосіб створення акустичних коливань / Шарапов В. М. та ін. – № 201102369; заявл. 28.02.11; опубл. 25.06.11, Бюл. № 12.
 13. Котельников В. А. Основы радиотехники / В. А. Котельников, А. М. Николаев. – М. : Гос. изд-во литературы по вопросам связи и радио, 1950. – Ч. I. – 372 с.
 2. Sharapov, V. M., Musienko, M. P. and Sharapova, E. V. (2006) *Piezoelektricheskie datchiki*, pod red. V. M. Sharapova. Moskva: Tehnosfera, 632 s. [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) *Elektroakusticheskie preobrazovateli*. – Moskva: Tehnosfera, 280 s. [in Russian]
 5. *Ultrazvukovye preobrazovateli dlya nerazrushayuschego kontrolya* (1986), pod red. I. N. Ermolova. Moskva: Mashinostroenie, 280 s. [in Russian]
 6. Sharapov, V. M. and Sotula, Zh. V. (2012) *Piezokeramicheskie preobrazovateli. Novye tehnologii proektirovaniya*. Moskva: *Elektronika*, (5), s. 96–102. [in Russian]
 7. Sharapov, V. M., Sotula, Zh. V., Kunitskaya, L. G. and Tkachenko, A. S. (2013) *Izmenenie parametrov piezoelektricheskikh preobrazovatelei s pomosh'yu dobavochnykh elementov*. Moskva: *Sovremennaya elektronika*, (3), s. 56–57. [in Russian]
 8. Sharapov, V. M., Sotula, Zh. V., Bazilo, K. V. et al. (2013) Characteristics improvement of the piezoelectric electro-acoustic transducers with additional contours. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universyety*, (2), pp. 65–70. [in Russian]
 9. Sharapov, V. M., Sotula, Zh. V., Bazilo, K. V. and Snytyuk, V. E. (2013) *Issledovaniye piezoelektricheskikh preobrazovatelei s dobavochnymi kolebatel'nymi konturami*. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universyety*, (1), s. 35–38. [in Russian]
 10. Pat. 56932 Ukraine. Elektroakustychnyi peretvoryuvach, Sharapov, V. M. ta in., № 201012464; zayavl. 22.10.10; opubl. 25.01.11, byul. № 2. [in Ukrainian]
 11. Pat. 56939 Ukraine. Elektroakustychnyi peretvoryuvach, Sharapov, V. M. ta in., № 201012498; zayavl. 22.10.10; opubl. 25.01.11, byul. № 2. [in Ukrainian]
 12. Pat. 60924 Ukraine. Sposib stvorenniya akustychnykh kolyvan', Sharapov, V. M. ta in., № 201102369; zayavl. 28.02.11; opubl. 25.06.11, byul. № 12. [in Ukrainian]
 13. Kotelnikov, V. A., Nikolaev, A. M. (1950) *Osnovy radiotekhniki*. Ch. I., Mosrva: Gosudarstvennoe izd-vo literatury po voprosam svyazi i radio, 372 s. [in Russian]

References

1. Sharapov, V. (2011) *Piezoceramic sensors*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 498 p.