

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВОГО ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Шарапов В. М.¹, д.т.н., профессор,
Савин В. Г.², д.т.н., профессор,
Сотула Ж. В.¹, к.т.н.,
Салагор А. М.¹, к.т.н.,
Заика В. М.¹, аспирант

¹ Черкасский государственный технологический университет
18006, бульв. Шевченко, 460, г. Черкассы, Украина, v_sharapov@rambler.ru
² НТУУ «КПИ»

03056, Соломенский район, пр-т Победы, 37, г. Киев, Украина

Анотація. У статті описано методи покращення характеристик кільцевого електроакустичного перетворювача шляхом зниження резонансної частоти та підвищення рівня звукового тиску. Для покращення характеристик перетворювача застосовано об'ємні резонатори та додаткові електричні коливальні контури. Наведено амплітудно-частотні характеристики кільцевого електроакустичного перетворювача.

Ключові слова: електроакустичний перетворювач, коливальний контур, амплітудно-частотна характеристика, звуковий тиск, об'ємний резонатор.

IMPROVING OF THE PROPERTIES OF RING ELECTROACOUSTIC TRANSDUCER

Sharapov V. M.¹, Dr.Tech.Sc., professor,
Savin V. G.², Dr.Tech.Sc., professor,
Sotula Zh. V.¹, Ph.D.,
Salagor A. M.¹, Ph.D.,
Zaika V. M.¹, postgraduate

¹ Cherkasy State Technological University
18006, Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, Ukraine, v_sharapov@rambler.ru
² NTUU «KPI»

03056, prospect Pobedy, 37, Kyiv, Ukraine

Abstract. In the article the methods of the improvement of properties of ring electroacoustic transducer by lowering of resonant frequency and increase of sound pressure level are considered. To improve the transducer properties cavity resonators and additional electrical oscillatory circuits are used. Amplitude-frequency response of ring electroacoustic transducer is given.

Keywords: electroacoustic transducer, oscillatory circuit, amplitude-frequency response, sound pressure, cavity resonator.

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

Пьезоэлектрические преобразователи широко используются в электроакустике, гидроакустике, в ультразвуковой (УЗ), медицин-

ской, 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.

В работах [2, 3] описаны методы синтеза пьезоэлектрических преобразователей.

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.

Важными характеристиками ЭАП являются резонансная частота f_p , уровень создаваемого звукового давления $P_{зв}$ и ширина полосы рабочих частот (полосы пропускания) Δf .

Кольцевой электроакустический преобразователь (КЭАП) представляет собой электромеханическую колебательную систему с достаточно высокой добротностью [5].

Электроды наносятся на внутреннюю и наружную боковые поверхности, а элемент поляризуется в направлении радиуса. Такой пьезоэлемент может работать при равномерном сжатии в радиальном направлении или при сжатии вдоль образующей (рис. 1).

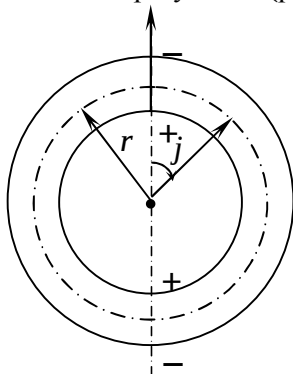


Рис. 1. Кольцевой электроакустический преобразователь

При радиальных колебаниях КЭАП осевая линия остается круговой с периодически изменяющимся радиусом. Циклическая частота собственных колебаний (резонансная) составляет

$$\omega_0 = \sqrt{E / (r \cdot \rho)^2 \cdot c^{-1}}, \quad (1)$$

где r – радиус осевой линии кольца, м;
 ρ – плотность материала.

Уточненная с учетом конструктивных характеристик формула для вычисления резонансной частоты КЭАП имеет вид:

$$F_r = \frac{2V_1^e \cdot t}{p(D+d)}, \quad (2)$$

где V_1^e – скорость звука в ПЭ, м/с; t – поправка, вводимая в зависимости от соотношения d/D ; D и d – наружный и внутренний диаметры, м; ε – относительная диэлектрическая проницаемость.

Недостатком этих преобразователей является сравнительно невысокий уровень звукового давления.

Целью данной работы является снижение резонансной частоты, повышение уровня звукового давления и расширение полосы пропускания КЭАП.

Снижение резонансной частоты и повышение уровня звукового давления позволяют увеличить дальность действия преобразователей. Расширение полосы пропускания преобразователей позволяет улучшить параметры подводной связи.

Для достижения поставленной цели авторами предложено присоединять к кольцевому пьезоэлементу дополнительные колебательные системы – механические и электрические.

Для оценки свойств КЭАП используем амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) как одну из наиболее информативных характеристик колебательных систем.

Для экспериментов использовался кольцевой ПЭ из пьезокерамики ЦТБС-3 наружным диаметром 116 мм, внутренним – 100 мм и высотой 40 мм (рис. 2).



Рис. 2. Кольцевой ПЭ:
 а) вид сбоку; б) вид сверху

На вход электроакустического преобразователя подавался синусоидальный сигнал амплитудой 1 В от генератора электрических колебаний ГЗ-106. АЧХ кольцевого электроакустического преобразователя по звуковому давлению измерялась с помощью шумомера фирмы RFT00 024 (рис. 3). Микрофон располагался на расстоянии 10 мм от преобразователя.

Как видно из рис. 3, на резонансной частоте преобразователя (10 кГц) уровень звукового давления составляет 103 дБ.

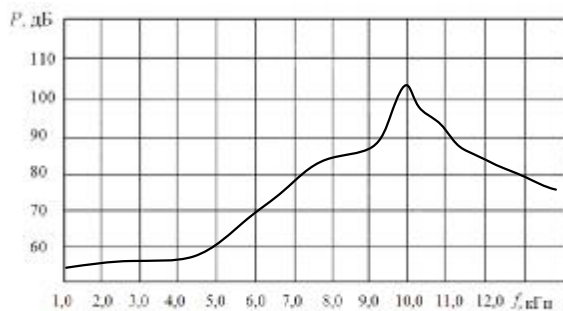


Рис. 3. АЧХ кольцевого ПЭ по звуковому давлению

Для увеличения уровня звукового давления авторами предложено к торцу КЭАП прикрепить металлический диск (рис. 4).

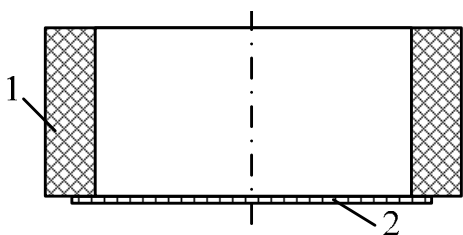


Рис. 4. КЭАП с металлическим диском: 1 – кольцевой ПЭ; 2 – металлический диск

Результаты измерений АЧХ показаны на рис. 5.

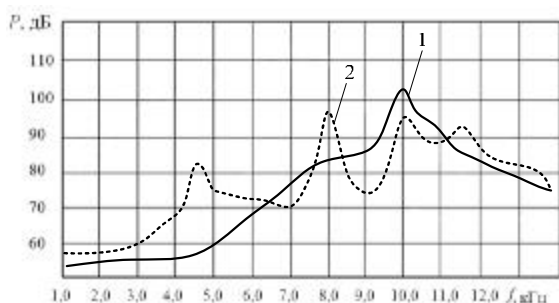


Рис. 5. АЧХ КЭАП (кривая 1) и КЭАП с металлическим диском (кривая 2)

Как видно из рис. 5, прикрепление металлического диска к торцу КЭАП позволило снизить резонансную частоту и расширить полосу рабочих частот.

Далее, на уже имеющуюся конструкцию (рис. 4) было закреплён ещё один металлический диск с отверстием (рис. 6).

Кольцевой ПЭ 1, металлический диск 2 и металлический диск 3 с отверстием 4 создают так называемый резонатор Гельмгольца (РГ) с внутренним объемом цилиндрической формы [9, 10].

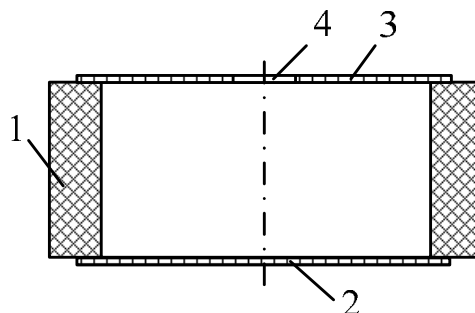


Рис. 6. КЭАП с металлическими дисками: 1 – кольцевой ПЭ; 2 – металлический диск (низ); 3 – металлический диск (верх); 4 – отверстие

Собственная частота резонатора Гельмгольца равна [9]:

$$f_r = \frac{c_0}{2p} \sqrt{\frac{S}{VL}}, \quad (3)$$

где f_r – частота, Гц;

c_0 – скорость звука в воздухе (~340 м/с);

S – сечение отверстия, м²;

L – длина отверстия, м;

V – объем резонатора, м³.

На рис. 7 показана АЧХ этого преобразователя.

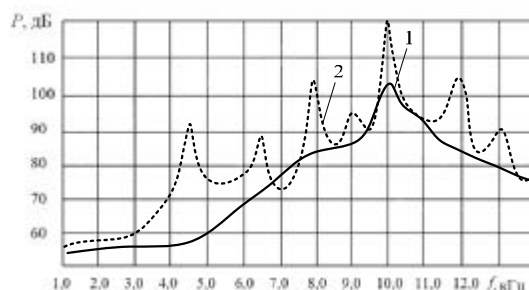


Рис. 7. АЧХ КЭАП (кривая 1) и с объемным резонатором (кривая 2)

Как видно из рис. 7, создание резонатора Гельмгольца позволило увеличить уровень выходного звукового давления на частотах 4,5 кГц на 35 дБ и на частотах 10 кГц – на 17 дБ.

Авторами предложено также поместить кольцевой ПЭ в полый металлический цилиндр с двумя крышками, которые закреплены на торцах цилиндра, причем верхняя крышка имеет отверстие (рис. 8). Этот преобразователь представляет собой объемный резонатор [4].

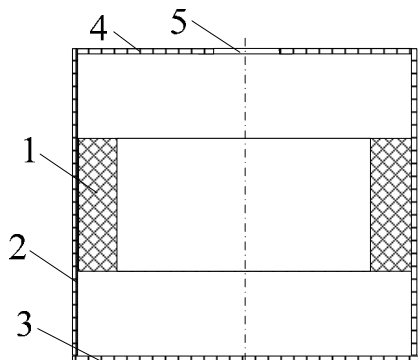


Рис. 8. КЭАП с полым цилиндром:
1 – кольцевой ПЭ; 2 – полый металлический цилиндр; 3 – металлический диск (низ); 4 – металлический диск (верх); 5 – отверстие

На рис. 9 показаны АЧХ КЭАП (рис. 2) (кривая 1) и с полым металлическим цилиндром на внешней поверхности (кривая 2).

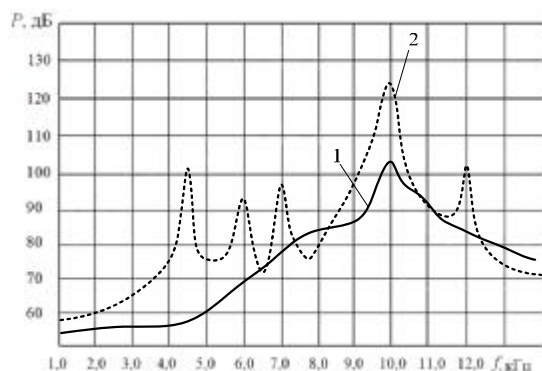


Рис. 9. АЧХ КЭАП (кривая 1) и с полым металлическим цилиндром на внешней поверхности (кривая 2)

По существу, этот преобразователь представляет собой двухконтурную колебательную систему, состоящую из электромеханической колебательной системы (ПЭ) и акустической (механической) колебательной системы – резонатора Гельмгольца.

Усиление резонатора характеризуется отношением максимального давления δ_{pm} в полости к максимальному (амплитудному) значению давления p_m в падающей звуковой волне:

$$n = \frac{\delta p_m}{p_m}, \quad (4)$$

где δ_{pm} – отношения максимального давления, p_m – максимальное значение давления.

Для расширения полосы рабочих частот авторами было предложено ввести дополни-

тельный электрический колебательный контур [11]. Эквивалентная электрическая схема этого преобразователя показана на рис. 10.

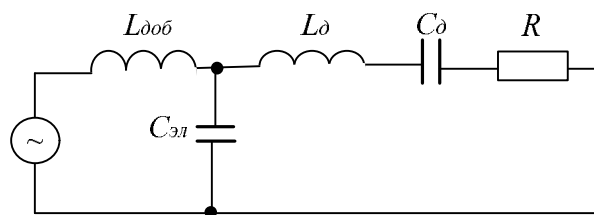


Рис. 10. Эквивалентная схема КЭАП с дополнительной индуктивностью

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

Если присоединить к входу пьезоэлемента индуктивность $L_{доб}$ таким образом, чтобы индуктивность и емкость между электродами $C_{эл}$ образовали последовательный колебательный контур $L_{доб}C_{эл}$ (рис. 10), то резонансную частоту можно определить по формуле (5) [2, 3]:

$$f_{доб} = \frac{1}{2p \sqrt{L_{доб} C_{эл}}}. \quad (5)$$

Резонансная частота собственно пьезоэлемента

$$f_{пэ} = \frac{1}{2p \sqrt{L_0 C_0}}. \quad (6)$$

Кроме того, возникает резонанс на частоте

$$f = \frac{1}{2p \sqrt{(L_{доб} + L_0) C_0}}. \quad (7)$$

Параметры колебательного контура КЭАП, рассчитанного на резонансную частоту 4,5 кГц, можно определить из соотношения (8)

$$L_{доб} = \frac{1}{4p^2 f_p^2 C_{эл}}, \quad (8)$$

где f_p – резонансная частота пьезоэлемента, $C_{эл}$ – межэлектродная емкость.

Результаты измерений АЧХ кольцевого электроакустического преобразователя с полым металлическим цилиндром и дополнительной индуктивностью показаны на рис. 11.

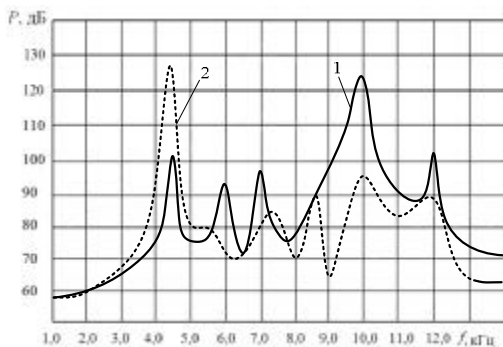


Рис. 11. АЧХ КЭАП с полым металлическим цилиндром (кривая 1) и с дополнительной индуктивностью (кривая 2), $L_{доб}=58$ мГн, $R_{доб}=10$ Ом

Как видно из рис. 11, использование дополнительного колебательного контура позволяет повысить уровень звукового давления до $P_{зв, max}=128$ дБ на частоте 4,5 кГц, а также расширить полосу частот преобразователя.

Выводы:

1. Для улучшения характеристик пьезоэлектрических электроакустических преобразователей могут использоваться дополнительные механические и электрические колебательные системы.

2. Разработан кольцевой пьезоэлектрический электроакустический преобразователь с резонатором Гельмгольца.

3. Изучено влияние добавочной индуктивности на амплитудно-частотные характеристики кольцевого электроакустического преобразователя.

4. Дальнейшие исследования могут быть направлены на построение математических моделей для различных конструктивных схем кольцевых 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., 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. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / [под ред. И. Н. Ермолова]. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
6. Фурдуйев В. В. Электроакустика / В. В. Фурдуйев. – М., Л.: ОГИЗ, 1948. – 193 с.
7. Ефимов А. П. Акустика / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В. И. Шоров. – М.: Радио и связь 1989. – 151 с.
8. Ландау Л. Д. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – [изд. 7-е, исправл.]. – М.: Наука, 1988. – 512 с. – («Теоретическая физика», т. II)
9. <http://www.avrora-elma.ru>
10. <http://www.bluesmobil.com>
11. Пат. 56928 Україна. Електроакустичний перетворювач / Шарапов В. М. та ін. – № 201012464; заявл. 22.10.10; опубл. 25.01.11, Бюл. № 2.

References

1. Sharapov, V. (2011) Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 498 p.
2. Sharapov, V. M., Musienko, M. P., Sharapova, E. V. (2006) Piezoelektricheskie datchiki. 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., Kunitskaya, L. G. (2013) Elektroakusticheskie preobrazovateli. Moskva: Tehnosfera, 280 p. [in Russian]
5. Ul'trazvukovyye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya (1986), pod red. I. N. Yermolova. Moskva: Mashinostroyeniye, 280 s. [in Russian]
6. Furduyev, V. V. (1948) Elektroakustika. Moskva, Leningrad: OGIZ, 193 s. [in Russian]
7. Yefimov, A. P., Nikonov, A. V., Sapozhkov, M. A., Shorov, V. I. (1989) Akustika. Moskva: Radio i svyaz', 151 s. [in Russian]
8. Landau, L. D., Lifshits, Ye. M. (1988) Teoriya polya, izdaniye 7-oe, ispravlennoye. Moskva: Nauka, 512 s. («Teoreticheskaya fizika», tom II) [in Russian]
9. <http://www.avrora-elma.ru>
10. <http://www.bluesmobil.com>
11. Пат. 56928 Україна. Електроакустичний перетворювач. Sharapov V. M. та ін., № 201012464; заявл. 22.10.10; опубл. 25.01.11, Бул. № 2.