

## ПОКРАЩЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

У роботі описано вплив елементів конструкції на характеристики п'єзоелектричного електроакустичного перетворювача. Приведені конструкції, а також діаграми спрямованості перетворювача. Розглянуті приклади покращення вибірковості центрального пелюстка електроакустичного перетворювача, шляхом додавання до конструкції додаткового об'ємного резонатора.

Ключові слова: електроакустичний перетворювач, біморфний п'єзоелемент, діаграма спрямованості, об'ємний резонатор, резонатор Гельмгольца.

V.M. ZAIKA

Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

### IMPROVING ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCER FOR ULTRASONIC MEASURING SYSTEMS

*Abstract – This work highlights the influence of structural elements on the characteristics of the piezoelectric electroacoustic transducer.*

*The major tasks of ultrasonic measuring systems are sound waves concentrated sending to the controlled object and reflected waves receiving. Electro-acoustic transducer is an oscillating system with a sufficiently high quality factor and contains an asymmetric bimorph element. Directional effect of concentration can be obtained using the irradiator as Helmholtz resonator consisting of bimorph piezoelectric resonator and tube of required length and diameter, which orients sound beam on the acoustic axis of the electroacoustic transducer.*

*An example of improving the selectivity of the central lobe electroacoustic transducer is adding additional cavity resonator to the construction of the piezoelectric transducer.*

*Key words: electroacoustic transducer, bimorph piezo element, radiation pattern, cavity resonator, Helmholtz resonator.*

#### Вступ

Пристрої, що перетворюють електричний сигнал в акустичний, називають електроакустичними перетворювачами (ЕАП) [1, 2]. Найчастіше як ЕАП використовують п'єзоелектричні перетворювачі (ПЕАП).

П'єзоелектричні перетворювачі широко використовуються в електроакустиці, в ультразвуковій, медичній, вимірjuвальній техніці, в скануючих зондових наномікроскопах, п'єзодвигунах, в інших галузях науки і техніки [3].

Для виготовлення п'єзоелектричних перетворювачів використовують п'єзоелементи у вигляді п'єзорезонаторів і п'єзотрансформаторів, котрі в ряді випадків дозволяють поліпшити характеристики перетворювачів [4].

У роботах [5-7] описані методи синтезу (створення, проектування) п'єзоелектричних перетворювачів. Ці методи дозволяють створювати перетворювачі з необхідними характеристиками.

Серед описаних технологій особливий інтерес представляє технологія додаткових елементів, так як у цьому випадку зміна характеристик перетворювача здійснюється за рахунок зовнішніх для п'єзоелемента ланцюгів [6].

Суть цієї технології полягає в тому, що до п'єзоелементи приєднують додаткові елементи, які змінюють характеристики перетворювача [8, 9].

Важливими характеристиками ЕАП є резонансна частота  $f_p$ , діаграма спрямованості  $\alpha$ , рівень створюваного звукового тиску  $P_{zv}$  і ширина смуги робочих частот (смуга пропускання)  $\Delta f$ .

Аналітичні вирази для розрахунку діаграм спрямованості (ДС) таких коливальних систем відсутні, тому визначення ДС часто проводять експериментальним шляхом, так як це є найбільш інформативним засобом при проектуванні п'єзоелектричних перетворювачів.

Тому метою даної роботи є покращення акустичних характеристик п'єзоелектричного перетворювача, які застосовуються в якості передавально – приймального елемента для ультразвукових вимірjuвальних систем.

#### Експериментальна частина

П'єзоелектричний електроакустичний перетворювач (ПЕАП) являє собою електромеханічну коливальну систему з досить високою добротністю, і містить асиметричний біморфний елемент (БПЕ) 1, який складається з металевої пластини із сталі 40Х діаметром 32 і товщиною 0,15 мм. П'єзоелемент 2, Ø23 і товщиною 0,2 мм приклеєний до пластини епоксидним компаундом (рис. 1, а). На вхід п'єзоелектричного перетворювача подавалася напруга від генератора ГЗ–109 амплітудою 1В. Діаграма спрямованості електроакустичного перетворювача по звуковому тиску (рис. 1, б) вимірювалася за допомогою шумоміра фірми RFT00 024. Мікрофон розташовувався над робочим зразком на такій відстані, щоб виконувалася умова перебування його в області сферичного випромінювання (зона дифракції Фраунгофера) [2], тобто:

$$r \geq 2d^2\lambda^{-1}, \quad (1)$$

де  $d$  – найбільший лінійний розмір перетворювача;  $\lambda$  – довжина хвилі.

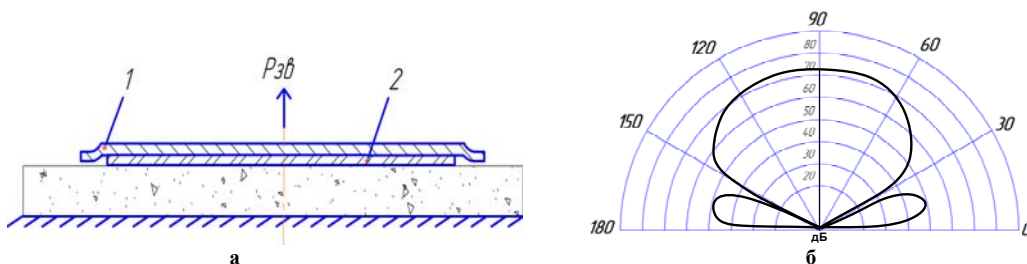


Рис. 1 Електроакустичний перетворювач (а) і його діаграма спрямованості (б)

Для підвищення рівня звукового тиску авторами запропоновано до ПЕАП додати об'ємний резонатор, який являє собою симетричну двоконтурну коливальну систему, що складається з електромеханічної коливальної системи (БПЕ) 1 та акустичної (механічної) коливальної системи – об'ємного резонатора 2. (рис. 2, а) [10] навантажену на внутрішню масу середовища  $M$  (2). Діаграма спрямованості перетворювача по звуковому тиску показана на рис. 2, б.

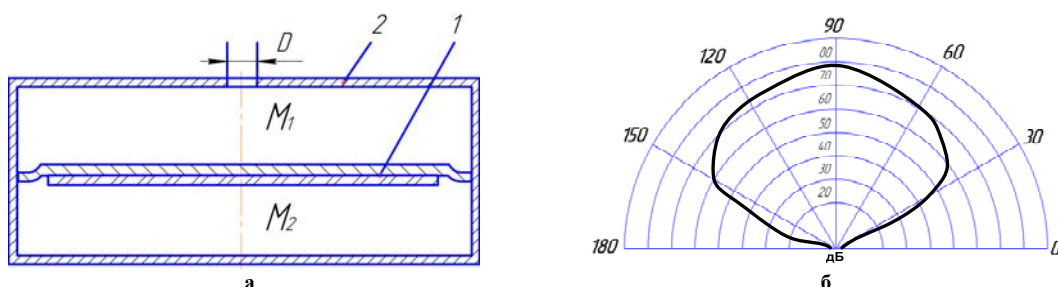


Рис. 2 Електроакустичний перетворювач з об'ємним резонатором (а) і його діаграма спрямованості (б)

На рис. 2, видно, що симетрія навантаження перетворювача дозволяє збільшити рівень вихідного звукового тиску, придушити бічні пелюстки – тим самим поліпшити геометрію спрямованості ПЕАП.

Коливальна маса середовища  $M$  (в грамах) визначається як:

$$M_1 = M_2, \tag{2}$$

$$M = 0,33\rho d^3. \tag{3}$$

Для повітря:

$$M = 8 \cdot 10^{-4} d^3. \tag{4}$$

П'єзоелектричний випромінювач кінцевих розмірів не є джерелом плоскої хвилі. Він випромінює енергію в деякому тілесному куті, причому для ПЕАП колювання в об'ємному резонаторі та характеристика спрямованості визначається як:

$$R_\beta = \frac{p_\beta}{p_0} = \frac{\left(2J_1 \frac{\pi d}{\lambda} \sin \beta\right)}{\frac{\pi d}{\lambda} \sin \beta}, \tag{5}$$

де  $p_\beta/p_0$  – відношення звукового тиску випромінювача при зсувах з його акустичної осі на кут  $\beta$ .

Враховуючи зв'язок між інтенсивністю звуку і звуковим тиском, можна записати:

$$\frac{I_\beta}{I_0} = \left[ \frac{2J_1 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \beta\right)}{\frac{\pi d}{\lambda} \sin \beta} \right]^2. \tag{6}$$

Рівняння (6) визначає силу звуку, вимірювану під кутом  $\beta$  до акустичної осі випромінювача по відношенню до значення сили звуку на осі випромінювача. При цьому необхідно враховувати, що сила звуку вимірюється на елементі поверхні, орієнтованому нормально до напрямку поширення хвилі.

Підсилення резонатора  $\nu$  характеризується відношенням максимального тиску  $\delta p_m$  в порожнині до максимального (амплітудного) значенню тиску  $p_m$  падаючої звукової хвилі:

$$\nu = \frac{\delta p_m}{p_m}, \tag{7}$$

де  $\delta p_m$  – відношення максимального тиску;  $p_m$  – максимальне значення тиску.

Потужність випромінюваних хвиль  $P_{ze}$  залежить від площі поверхні  $S$ , амплітуди колювань  $\xi$  і довжини випромінюваної хвилі  $\lambda$ , в той час як спрямованість визначається лише геометрією поверхні, що

випромінює (або геометрією розміщення джерел звуку при побудові групових систем) і довгої хвилі. Для жорстко закріпленого акустичного перетворювача, що випромінює в середу однією стороною, справедливий вираз (8):

$$P_{зв} = \frac{\pi^3}{2} \rho c S (\xi f d)^2 \cdot 10^{-7} \left[ 1 - \frac{2J_1\left(2\pi \frac{d}{\lambda}\right)}{2\pi \frac{d}{\lambda}} \right] Bm, \quad (8)$$

де  $S$  – площа поверхні випромінювача;  $\xi$  – амплітуда коливань торця акустичного перетворювача, см;  $f$  – частота, Гц;  $d$  – діаметр резонатора, см;  $\lambda$  – довжина хвилі, см;  $J_1$  – символ функції Бесселя першого порядку.

Найважливішими завданнями ультразвукових вимірювальних систем є концентрована посылка звукових хвиль до контрольованого тіла і направлений прийом відбитих хвиль. Про виміри дистанцій можна говорити лише в зв'язку з певною просторовою орієнтацією каналу випромінювання. Направлене випромінювання хвиль є різновид координатної прив'язки вимірювального інструмента до об'єкта вимірювань; спрямованість акустичного променя в деякій мірі тотожна світловому променю. Разом з тим аналогія зі світловим променем у цьому випадку досить віддалена, оскільки різниця в довжинах акустичних і світлових хвиль досить істотна [7].

Для виключення попадання сигналів відбитих від сусідніх контрольованих елементів, а також для збільшення щільності потоку відображеної енергії необхідно мати малий діаметр випромінювача і по можливості малий кут розбіжності звукового пучка. Ці дві вимоги суперечать один одному, оскільки для зменшення кута розбіжності корисного сигналу необхідно пропорційно збільшувати діаметр випромінювача, а це призводить до збільшення початкового діаметра звукового пучка. Проте існують методи, при яких розміри звукового пучка будуть мінімальними! Такий ефект можна отримати застосовуючи як опромінювач резонатор Гельмгольца, який складається з біморфного п'єзоелемента **1** і повітряного резонатора **2**, на якому встановлена резонаторна трубка **3** необхідної довжини та діаметру (рис. 3, а), яка просторово орієнтує звуковий пучок щодо акустичної осі електроакустичного перетворювача. Діаграма спрямованості перетворювача по звуковому тиску показана на рис. 3, б.

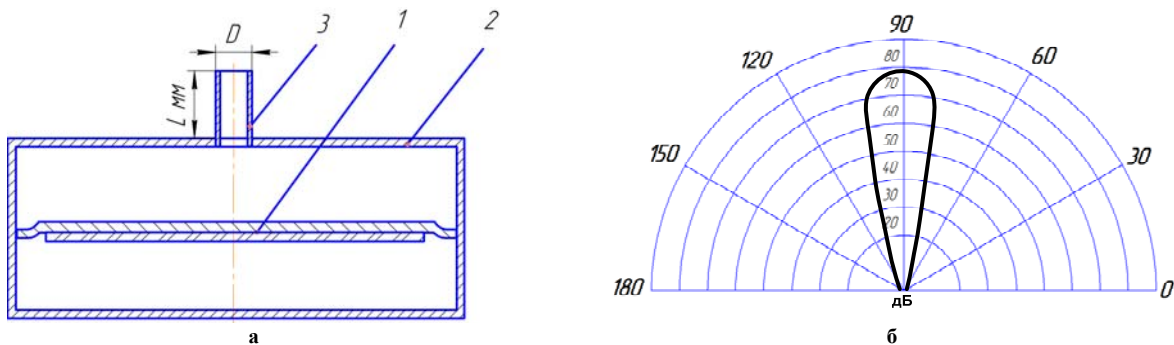


Рис. 3 Електроакустичний перетворювач з резонатором Гельмгольца (а) і його діаграма спрямованості (б)

Діаметр і довжину трубки розраховують виходячи з виразів (9, 10):

$$L = \frac{C_0}{4f}; \quad (9)$$

$$D = \sqrt{\frac{2kC_0L}{f}}, \quad (10)$$

де  $k$  – числовий коефіцієнт, що враховує відносну зміну звукового тиску на межі звукової плями;  $L$  – довжина резонаторної трубки;  $C_0$  – швидкість розповсюдження звука в повітрі (340 м/с);  $f$  – резонансна частота.

Власна частота резонатора Гельмгольца дорівнює:

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}}, \quad (11)$$

де  $f_r$  – частота, Гц;  $c_0$  – швидкість звуку в повітрі (~ 340 м/с);  $S$  – перетин отвору, м<sup>2</sup>;  $L$  – довжина резонаторної трубки, м;  $V$  – об'єм резонатора, м<sup>3</sup>.

У висновку слід зазначити, що використання об'ємних резонаторів, а також резонаторів Гельмгольца як елементів конструкції, дозволяє розширити можливості проектування електроакустичних перетворювачів для ультразвукових вимірювальних систем.

## Висновки

1. Розроблено п'єзоелектричний електроакустичний перетворювач з об'ємним резонатором і поліпшеними характеристиками.

2. Для поліпшення характеристик п'єзоелектричних електроакустичних перетворювачів можуть використовуватися додаткові механічні коливальні контури, зокрема резонатори Гельмгольца.

3. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на побудову математичних моделей для різних конструктивних схем п'єзоелектричних перетворювачів.

## Література

1. Sharapov V. Piezoceramic sensors / V. Sharapov. – Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2011. – 498 p.

2. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

3. Sharapov V. Piezoelectric electroacoustic transducers / V. Sharapov, Zh. Sotula, L. Kunitskaya. – Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2013. – 240 p.

4. Пьезокерамические трансформаторы и датчики / В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ж.В. Сотула, К.В. Базило, Л.Г. Куницкая / Под ред. В.М. Шарапова. – Черкассы: Вертикаль, 2010. – 278 с.

5. Шарапов В.М. Технологии синтеза пьезокерамических датчиков // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – №3. – С. 90-96.

6. Шарапов В.М. Пьезокерамические преобразователи. Новые технологии проектирования / В.М. Шарапов, Ж.В. Сотула // Электроника НТБ. – 2012. – №5. – С. 96-102.

7. Горбатов А.А. Акустические методы измерения расстояний и управления / А.А. Горбатов, Г.Е. Радашевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 207 с.

8. Ткаченко О.С. Дослідження впливу додаткового опору на амплітудно-частотні характеристики п'єзоелектричних перетворювачів / О.С. Ткаченко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – №1. – С. 108-112.

9. Базіло К.В. Схемотехнічне моделювання п'єзоелектричного перетворювача з додатковими коливальними контурами / К.В. Базіло // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2013. – №6. – С. 166-169.

10. Пат. 88566 Україна, МПК H04R 17/00. Электроакустичний перетворювач / В.М. Шарапов, А.М. Салогор Ж.В. Сотула, В.М. Заїка. – № 201310708 ; заяв. 05.09.13 ; опубл. 25.03.13, бюл. № 6.

## References

1. Sharapov V. Piezoceramic sensors / V. Sharapov. – Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2011. – 498 p.

2. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. P'ezoelektricheskie datchiki. Moscow, Technosfera, 2006, 632 p. [in Russian]

3. Sharapov V. Piezoelectric electroacoustic transducers / V. Sharapov, Zh. Sotula, L. Kunitskaya. – Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2013. – 240 p.

4. Sharapov V.M., Minaev I.G., Sotula Zh.V., Bazilo K.V., Kunitskaya L.G. P'ezokeramicheskie transformatory' i datchiki. Cherkasy, Vertikal', 2010, 278 p. [in Russian]

5. Sharapov V.M. Tekhnologii sinteza p'ezokeramicheskix datchikov, *Visnyk ChDTU*, Cherkasy, 2010, No. 3, pp. 90-96. [in Russian]

6. Sharapov V.M., Sotula Zh.V. P'ezokeramicheskie preobrazovateli. Novy'e tekhnologii proektirovaniya, *E'lektronika NTB*, 2012, No. 5, pp. 96-102. [in Russian]

7. Gorbatov A.A. Akusticheskiye metody izmereniya rasstoyaniy i upravleniya / A.A. Gorbatov, G.Ye. Radashevskiy. – M.: Energoizdat, 1981. – 207 p. [in Russian]

8. Tkachenko O.S. Doslidzhennia vplyvu dodatkovoho oporu na amplitudno-chastotni kharakterystyky piezoelektrychnykh peretvoriuvachiv, *Visnyk Khmelnytskogo Natsionalnogo Universytetu*, Tekhnichni nauky, Khmelnytsky 2012, No. 1, pp. 108-112. [in Ukrainian]

9. Bazilo K.V. Skhemotekhnichne modelyuvannya p'ezoelektrychnoho peretvoryuvacha z dodatkovymy kolyval'nymy konturamy, *Visnyk Khmelnytskogo Natsionalnogo Universytetu*, Tekhnichni nauky, Khmelnytsky 2013, No. 6, pp. 166-169. [in Ukrainian]

10. Pat. 88566 Ukraina, MPK H04R 17/00. Elektroakustychnyi peretvoriuvach / V.M. Sharapov, Zh.V. Sotula, A.M. Salogor, V.M. Zaika. – No. 201310708 ; zaiavl. 05.09.13; opubl. 25.03.13, biul. No. 6. [in Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 7.5.2014 р. Надрукована/Printed : 18.5.2014 р.

Рецензент: Шарапов В.М., д.т.н., професор завідувач кафедри КІТП, ЧДТУ, Черкаси