

## ЗБУДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ЗГИНУ В ЦИЛІНДРИЧНИХ П'ЄЗОЕЛЕМЕНТАХ

Робота присвячена вдосконаленню п'єзоелектричних перетворювачів. Особливе місце п'єзоелектричні перетворювачі займають в електро- і гідроакустиці, де вони використовуються для випромінювання і прийому акустичних коливань в повітряному або водному середовищі. Загальним завданням перетворювачів п'єзоелектричних випромінювачів є збільшення дальності дії. Для виготовлення перетворювачів використовуються мономорфні і біморфні елементи. Описано спосіб збудження коливань згину в циліндричних мономорфних п'єзоелементах. Наведено схеми підключення радіально поляризованого циліндричного п'єзоелемента для збудження коливань згину при різному взаємному розташуванні векторів електричного поля напруги збудження і вектора поляризації. Створення двох контурів збудження у схемі п'єзоелемента дозволило підвищити рівень звукового тиску.

Ключові слова: п'єзоелектричний перетворювач, випромінювач, коливання згину, коливальний контур.

K.V. BAZILO

Cherkasy State Technological University

## STIMULATION OF BENDING VIBRATIONS IN CYLINDRICAL PIEZOELEMENTS

*Abstract – The work is devoted to perfection of piezoelectric transducers. A special place is occupied by piezoelectric transducers in electrical and underwater acoustics, where they are intended for radiation and reception of acoustic vibrations in the air or the aquatic environment. The overall objective in improving the piezoelectric transducers is to increase the range of action. For the transducers manufacture are used monomorphic and bimorph elements. The method of generation of bending vibrations in monomorphic cylindrical piezoelectric elements is described. Schemes of radially polarized cylindrical piezoelectric element to stimulate bending vibrations at different mutual arrangement of the electric field vector of the stimulating voltage and the polarization vector are given. Creating two oscillatory circuits in the circuit of piezoelectric element will increase the sound pressure level.*

*Key words: piezoelectric transducer, projector, bending vibrations, oscillatory circuit.*

### Вступ

П'єзоелектричні перетворювачі широко застосовуються в електроакустиці, гідроакустиці, вимірвальній техніці, неруйнівному контролі, в п'єзодвигунах, в сканерах наномікроскопів, інших областях науки і техніки [1-4].

Особливе місце п'єзоелектричні перетворювачі займають в електро- і гідроакустиці, де вони призначені для випромінювання і прийому акустичних коливань в повітряному або водному середовищі [3, 4].

П'єзоелектричні перетворювачі, що використовуються в гідроакустиці, діляться на два великі класи:

- перетворювачі-приймачі акустичного сигналу (датчики, сенсори);
- перетворювачі-випромінювачі акустичного сигналу.

Загальною задачею при вдосконаленні випромінювачів є збільшення дальності дії, що можливо досягти шляхом:

- зниження робочої (резонансної) частоти  $\gamma$  (або)
- збільшення потужності випромінювання (підвищення рівня звукового тиску).

Відомо, що низькочастотний звук поширюється у воді практично без загасання на відстані до декількох тисяч кілометрів завдяки формуванню у верхньому шарі океану підводного звукового каналу – акустичного хвилеводу рефракційного типу. Саме завдяки цьому низькочастотна акустика має очевидні переваги у вирішенні широкого кола задач [7, 8].

Для виготовлення електроакустичних перетворювачів використовуються мономорфні п'єзоелементи, які складаються з одного п'єзоелемента, а також біморфні елементи, які складаються з двох п'єзоелементів або п'єзоелемента і металевої пластини, з'єднаних за допомогою клею або припою [2, 4].

Найбільш часто в електро- і гідроакустиці використовуються асиметричні біморфні п'єзоелементи (БПЕ), які мають порівняно низьку резонансну частоту і високий рівень створюваного звукового тиску, однак вони складніше мономорфних і, крім того, містять клейове з'єднання, яке зменшує механічну міцність БПЕ [1-4].

Мономорфні п'єзоелементи (МПЕ) мають порівняно високу резонансну частоту, що в ряді випадків (зокрема, в гідроакустиці) є недоліком. Для зменшення робочої (резонансної) частоти в МПЕ необхідно створювати коливання згину.

Отже, метою даної роботи є збудження низькочастотних коливань згину в циліндричних п'єзоелементах.

### Основна частина

Розглянемо коливання циліндра, що збуджуються зовнішніми гармонійними навантаженнями [7]. В якості таких можуть виступати електричне поле, що виникає під дією різниці потенціалів, прикладеної до електродованих циліндричних поверхонь  $r_0 \pm h$ , і (або) механічні зусилля, наприклад тиск з боку зовнішнього середовища на циліндричні поверхні.

Провідність п'єзоциліндра визначатиметься як

$$Y = 4i\omega \frac{(r_0 + h)l}{V_0} \sum_n \frac{1}{n} D_r^{(n)}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (1)$$

Ряд (1) є не гармонійним, а знакозмінним, тому він сходиться. Без урахування дисипації провідність носить чисто реактивний характер і має полюс і нуль на частотах резонансу й антирезонансу [7].

Розглянемо далі випадок, коли електроди на циліндричних поверхнях розділені на 4 частини (секції 1-4, 1'-4'), як це показано на рис. 1.

Збудимо в цьому п'єзоелементі коливання згину. Це питання вивчимо експериментально.

Для експериментів використовувався циліндричний п'єзоелемент Ø32×Ø28×20 мм з п'єзокераміки ЦТС-19, поляризований радіально.

Основна резонансна частота коливань згину – 4,15 кГц.

Елементами, які можуть створювати коливання згину, є секції циліндра, обмежені електродами:

а) 1-1', 2-2', 3-3', 4-4' – в цьому випадку при подачі електричної напруги на відповідні пари електродів (наприклад, 1-1') п'єзоелемент в зоні дії цієї секції збільшує або зменшує кривизну (вектор електричного поля паралельний вектору поляризації,  $\alpha = 0^\circ$ );

б) при подачі електричної напруги на пари зовнішніх або внутрішніх електродів (наприклад, 1-2, 1'-2', 1-2' тощо) виникають деформації зсуву, які призводять до вигину п'єзоелемента (вектор електричного поля знаходиться під кутом  $\alpha$  до вектора поляризації,  $\alpha \approx 90^\circ$ ).

Результати вимірювань наведені в табл. 1.

У цій таблиці в другій графі вказані електроди, до яких підключається сигнальний вихід генератора, а в третій – електроди, які підключаються до «нульового» проводу.

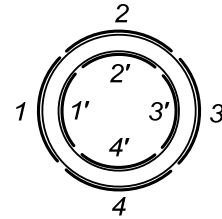


Рис. 1. П'єзоелемент у формі порожнистого циліндра: 1-4, 1'-4' – електроди

Таблиця 1

№	Сигнальний вихід генератора	«Нульовий» провід генератора	f, кГц	C <sub>ед</sub> , нФ	L, Гн	P, дБ
1	2	2'	4,15	3,68		78,7
2	2+4	2'+4'	4,15	7,19		84
3	2+4	1'+3'	4,15	1,12		87,2
4	2+4	1+3	4,15	1,12		88
5	2+4+1'+3'	2'+4'+1+3	4,15	14,5		89,7
6	1+2+3+4	1'+2'+3'+4'	4,15	14,29		<70
7			4,15	7,19	0,202	108,5
8			4,15	1,12	1,28	101
9			4,15	14,5	0,1	112

Як видно з табл. 1, при куті  $\alpha = 0^\circ$  (варіанти 1, 2) в п'єзоелементі виникають коливання згину,

причому збільшення кількості електродів призводить до збільшення звукового тиску (варіант 2).

Коливання згину виникають також при  $\alpha \rightarrow 90^\circ$  (варіанти 3, 4).

Найбільший звуковий тиск створюється при одночасному створенні електричного поля при  $\alpha = 0^\circ$  і  $\alpha \rightarrow 90^\circ$  (варіант 5). Тут необхідно зазначити, що в цьому випадку має значення фаза відповідних електричних напруг, полярності електродів п'єзоелемента і виникаючих деформацій (варіанти 5, 6).

З'єднання електродів за варіантом 5 забезпечує максимальне значення звукового тиску для даного п'єзоелемента.

Подальше збільшення звукового тиску можливе при використанні схем з додатковою індуктивністю [8] (варіанти 7, 8 й 9, а також рис. 2).

Обидва варіанти, показані на рис. 2, створюють звуковий тиск 112 дБ.



Рис. 2. Схеми підключення додаткових індуктивностей до циліндричного п'єзоелемента:  
а)  $L_1 = 0,193$  Гн;  $L_2 = 0,210$  Гн; б)  $L_1 = 0,192$  Гн;  $L_2 = 0,197$  Гн

### Висновки

Описано спосіб збудження коливань згину в циліндричних мономорфних п'єзоелементах. Наведено схеми підключення радіально поляризованого циліндричного п'єзоелемента для збудження коливань згину при різному взаємному розташуванні векторів електричного поля напруги збудження і вектора поляризації. Збільшення звукового тиску, створюваного циліндричними п'єзоелементами, можливе при використанні схем з додатковими індуктивностями.

### Література

1. Sharapov V. Piezoceramic sensors. 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., Sotula Zh., Kunitskaya L. Piezoelectric electroacoustic transducers. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2013, 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. Институт прикладной физики. – Режим доступа: [www.ipfran.ru](http://www.ipfran.ru)
6. Подводные электроакустические преобразователи: Справочник / Под ред. В.В. Богородского // Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
7. Шульга Н.А. Колебания пьезоэлектрических тел / Н.А. Шульга, А.М. Болкисев. – К.: Наукова думка, 1990. – 228 с.
8. 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.

### References

1. Sharapov V. Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2011, 498 p.
2. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. P'ezoelektricheskie datchiki. Moscow, Texnosfera, 2006, 632 p. [in Russian]
3. Sharapov V., Sotula Zh., Kunitskaya L. Piezoelectric electroacoustic transducers. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2013, 240 p.
4. Sharapov V.M., Minaev I.G., Sotula Zh.V., Kunitskaya L.G. E'lektroukusticheskie preobrazovateli. Moscow: Texnosfera, 2013, 280 p. [in Russian]
5. Institut prikladnoj fiziki. – Rezhim dostupa: [www.ipfran.ru](http://www.ipfran.ru)
6. Podvodny'e e'lektroukusticheskie preobrazovateli: Spravochnik / Pod red. V.V. Bogorodskogo // Leningrad: Sudostroenie, 1983, 248 p. [in Russian]
7. Shul'ga N.A., Bolkisev A.M. Kolebaniya p'ezoelektricheskikh tel. Kyiv: Naukova dumka, 1990, 228 p. [in Russian]
8. Bazilo K.V. Shemotekhnichne modeliuвання piezoelektrychnogo peretvoriuvacha z dodatkovymy kolyvalnymy konturamy, Visnyk Khmelnytskogo Natsionalnogo Universytetu, Technical sciences, Khmelnytsky 2013, No. 6, pp. 166–169. [in Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 19.9.2014 р.

Надрукована/Printed : 1.10.2014 р.

Рецензент: д.т.н., професор В.М. Шарапов