

# Випромінювання звуку циліндричним п'єзокерамічним перетворювачем з радіальною поляризацією і жорстким екраном

Шишкова К. А., ORCID [0000-0002-8564-5582](https://orcid.org/0000-0002-8564-5582)

Лейко О. Г., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)

Кафедра акустики та акустoeлектроніки [acoustic.kpi.ua](http://acoustic.kpi.ua)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [kpi.ua](http://kpi.ua)

Київ, Україна

**Анотація**—Розглянута акустична антена, відбивач якої виконаний у вигляді акустично жорсткого екрану, а джерелом звуку є циліндричний п'єзокерамічний перетворювач з радіальною поляризацією. Висота випромінювача вважається нескінченно великою, тому розподіл швидкостей рівномірний. Внутрішній об'єм перетворювача заповнений вакуумом або газом. Задача випромінювання звуку такою антеною вирішена з використанням методів зв'язаних полів і часткових областей. Всі фізичні поля антени представлені у вигляді розкладання в ряди Фур'є, коефіцієнти яких визначаються в результаті розв'язку диференціальних рівнянь, що описують електропружні коливання п'єзокерамічного перетворювача і хвильові процеси в акустичних середовищах, що контактують з ним. Розв'язок задачі випромінювання звуку зведено до розв'язку методом редукції нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

**Ключові слова** — звукові поля; циліндричний п'єзокерамічний перетворювач; акустично жорсткий екран.

## I. ВСТУП

При практичній реалізації акустичних технологій управління поведінкою живих істот в зоні управління необхідно сформувати акустичне поле з певними характеристиками. Для цього треба мати електроакустичні перетворювачі, які можуть забезпечити формування таких характеристик. Одним з таких перетворювачів є циліндричний перетворювач із зовнішнім акустичним екраном. Він складається (рис.1) із циліндричного перетворювача 1 і акустичного екрану 2. Перетворювач 1 являє собою п'єзокерамічний циліндр, виконаний, наприклад, у вигляді співвісної системи суцільних кілець 3 з електродами, нанесеними на їх циліндричні поверхні, що забезпечує їх радіальну поляризацію. Акустичний екран 2 має форму незамкнутого кільцевого шару кінцевої товщини. Оскільки екранований випромінювач призначений для роботи в повітрі, то його акустичний екран не може бути акустично м'яким. Тому його технічна реалізація може бути наближеною до жорсткого.

В опублікованій літературі досліджувалися акустичні поля, що формуються циліндричними випромінювачами із зовнішніми екранами як різної форми їх побудови, так і з різними значеннями акустичної жорсткості. Зокрема, значна частина робіт [1 - 9] присвячена виконанню екранів з акустично м'якою поверхнею у вигляді незамкнутих кільцевих шарів [1 - 6], плоских [7] або замкнутих [3, 9] поверхонь. Певна

увага приділена акустичним екранам із скінченими значеннями їх акустичної жорсткості [3, 8]. Але циліндричні перетворювачі з жорсткими поверхнями екранів у вигляді незамкнутих кільцевих шарів не досліджувались.

В той же час, в останні роки, з'явилась необхідність у виконанні проектних робіт по таким перетворювачам, а відтак, і у створенні теоретичних основ розрахунків їх параметрів. Це пов'язано із застосуванням екранованих циліндричних перетворювачів для формування акустичних полів, як у повітряному середовищі, так і в рідинних середовищах з великими значеннями гідростатичного тиску, де технічна реалізація акустично м'яких екранів практично неможлива [10].

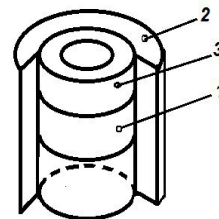


Рис. 1. Циліндричний перетворювач із зовнішнім акустичним екраном

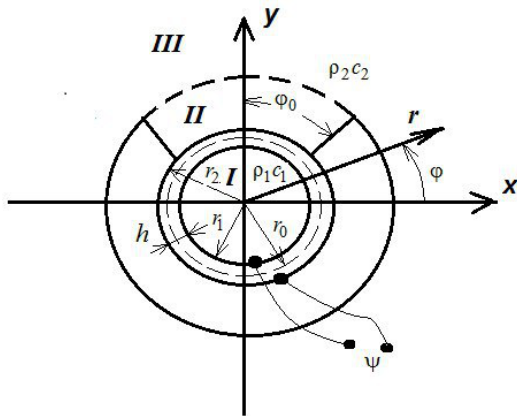


Рис. 2. Нормальний переріз циліндричного п'єзокерамічного перетворювача з екраном

Метою цієї роботи є визначення аналітичних співвідношень, що описують акустичні поля циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів з жорсткими акустичними екранами у вигляді незамкнених кільцевих шарів.

## II. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розв'яжемо задачу випромінювання звуку екранованим циліндром, нормальний переріз якого зображено на рис 2.

Визначимо аналітичні співвідношення, які визначають акустичне поле такого випромінювача.

Система диференціальних рівнянь, яка описує випромінювання звуку таким екранованим перетворювачем, включає [1, 11]:

- рівняння Гельмгольца описує рух середовища в середині та зовні перетворювача  $\Delta\Phi + k_j\Phi = 0$ ;
- рівняння руху тонких п'єзокерамічних оболонок з радіальною поляризацією в переміщеннях:

$$(1+\beta)\frac{\partial^2 u}{\partial\varphi} + \frac{\partial w}{\partial\varphi} - \beta\frac{\partial^2 w}{\partial\varphi^3} = \alpha\gamma\frac{\partial^2 u}{-\partial t^2};$$

$$-\frac{\partial u}{\partial\varphi} + \beta\left(\frac{\partial^3 w}{\partial\varphi^3} - \frac{\partial^4 w}{\partial\varphi^4}\right) - w\frac{e_{31}}{c_{11}^E}r_0\frac{\psi_0}{h} + \frac{\alpha}{h}q_r =$$

$$= \alpha\gamma\frac{\partial^2 w}{\partial t^2};$$

- рівняння вимушеної електростатики для п'єзокераміки  $\vec{E} = -grad\psi; div\vec{D} = 0$ .

В (1) наведені наступні позначення:  $\Phi$  – потенціал швидкості акустичного поля;  $k_j, j = 1, 2$  – хвильові числа внутрішнього ( $j = 1$ ) і зовнішнього ( $j = 2$ ) середовищ;  $u, w$  – відповідно тангенціальні та нормальні компоненти вектора зміщення точок серединної поверхні оболонки;  $e_{31}, C_{11}^E, \gamma$  – відповідно п'єзоконстанта, модуль пружності при нульовій електричній напруженості та густина п'єзокераміки оболонки;

$\vec{E}, \vec{D}$  – вектори напруженості та індукції електричного поля  $\psi$  перетворювача;  $q_r$  – зовнішнє навантаження оболонки перетворювача. Вирази для  $\alpha, \beta$  наведені в роботах [1, 11].

Вважаємо, що внутрішній об'єм п'єзокерамічної оболонки випромінювача заповнений середовищем з густиною  $\rho_1$  та швидкістю звуку  $c_1$ . Це середовище може бути вакуумом або газом. Радіальна поляризація реалізується шляхом нанесення електродів на циліндричні поверхні оболонки. До електродів оболонки підводиться гармонійно змінювана в часі  $t$  електрична напруга  $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$  частотою  $\omega$ . Товщина  $h$  приймається набагато меншою за середній радіус  $h \leq r_0$ . Вважаємо, що висота випромінювача являється нескінченно великою, тому розподіл коливальної швидкості по висоті випромінювача однорідний. Акустичний екран товщиною  $r_3 - r_2$  та кутом розчину  $2\varphi_0$  виконано з ідеально акустично жорсткого матеріалу. Випромінювач розміщується в середовищі з густиною  $\rho_2$  та швидкістю звуку  $c_2$ .

Сформулюємо граничні умови задачі в наступному вигляді:

- на внутрішніх стінках екрану:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\varphi} = 0; |\varphi| = \varphi_0, r_2 \leq r \leq r_3; \quad (2)$$

- на зовнішній поверхні екрану:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial r} = 0; \varphi_0 \leq |\varphi| \leq \pi, r = r_3; \quad (3)$$

- електричні умови зводяться до задання напруженості електричного поля в матеріалі оболонки:

$$E_r = -\frac{\psi_0}{h}.$$

Представимо шукані величини  $u$  і  $w$  у вигляді рядів Фур'є по власним формам коливань оболонки в вакуумі:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin(n\varphi), w = \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos(n\varphi). \quad (4)$$

Рішення рівняння Гельмгольца будемо здійснювати методом часткових областей. Для цього, розіб'ємо всю область існування акустичного поля на три часткові області: I область – внутрішня область випромінювача ( $|\varphi| \leq \pi, 0 \leq r \leq r_1$ ), яка в залежності від виду конструкції перетворювача може бути вакуумована або заповнена газом з параметрами  $\rho_1 c_1$ ; II область – частина робочої області, яка замкнена між стінками екрану ( $|\varphi| \leq \varphi_0, r_2 \leq r \leq r_3$ ) і яка контактує з робочою поверхнею перетворювача; III область – робоча область середовища з параметрами  $\rho_2 c_2$  ( $|\varphi| \leq \pi, r \geq r_3$ ), яка оточує перетворювач. Відповід-



ний вибір граничних умов на межах доповнює загальну систему рівнянь, що описують роботу екранованого перетворювача. Тобто, на поверхні перетворювача, що контактує з середовищем, формується рівність швидкості нормальних зміщень поверхні п'єзокерамічної оболонки та коливальної швидкості частинки середовища, як зовнішнього – робочого, так і внутрішнього, що знаходиться всередині перетворювача. На зовнішній та внутрішній поверхнях перетворювача формується рівність нормальних напружень, що створюються тиском та нормальними пружними напруженнями п'єзокераміки. Такі ж само умови формуються на межі II та III областей.

Тоді повна система вихідних співвідношень задачі включає в себе наступні умови спряження звукових полів на границях розділу областей та граничні умови на зовнішній поверхні екрану:

- рівність швидкостей коливань частинок середовища і швидкості нормальної складової зміщень поверхні оболонки :

$$-\frac{\partial \Phi_1}{\partial r} = \frac{\partial w}{\partial t}, |\varphi| \leq \pi, r = r_1; \quad (5)$$

$$-\frac{\partial \Phi_{11}}{\partial r} = \frac{\partial w}{\partial t}, |\varphi| \leq \varphi_0, r = r_2; \quad (6)$$

- на поверхні оболонки випромінювача виконується умова рівності складової тензора напружень  $\sigma_r$  звуковому тиску нормальної складової взятої з протилежним знаком:

$$\sigma_r = q_r = -(P_{11} - P_1), |\varphi| \leq \varphi_0, r = r_2, \quad (7)$$

де  $P_{11} = \rho_2 \frac{\partial \Phi_{11}}{\partial t}$ ;  $P_1 = \rho_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial t}$  – радіальні напруження від динамічного тиску.

$$\Phi_{111} = \Phi_{11}, |\varphi| \leq \varphi_0, r = r_3; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi_{111}}{\partial r} = \begin{cases} 0, \varphi_0 \leq |\varphi| \leq \pi; \\ \frac{\partial \Phi_{11}}{\partial r}, |\varphi| \leq \varphi_0, r = r_3 \end{cases}. \quad (9)$$

Потенціал швидкості акустичного поля, створюваний перетворювачем, можна представити через потенціал швидкості в кожній із вказаних областей [2]:

- в області I, що не має особливостей у внутрішньому об'ємі перетворювача :

$$\Phi_1 = \sum_{m=0}^{\infty} E_m J_m(k_1 r) \cos(m\varphi);$$

- в області II:

$$\Phi_{11} = \sum_{q=0}^{\infty} \left[ A_q J_{m_q}(k_2 r) + B_q N_{m_q}(k_2 r) \right] \cos(m_q \varphi); \quad (10)$$

- в області III, з урахуванням умов випромінювання на нескінченності:

$$\Phi_{111} = \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)}(kr) \cos(s\varphi);$$

де  $J_n(k_1 r), N_{m_q}(k_2 r), H_s^{(1)}(k_2 r)$  – функції Бесселя, Неймана, Ханхеля першого роду;  $E_m, A_q, B_q, F_s$  – невідомі комплексні коефіцієнти.

Вираз для потенціалу швидкості  $\Phi_{11}$  задовольняє рівнянню Гельмгольца при довільних  $m_q$ . Належним вибором цієї величини можливо досягти задоволення граничних умов в області II. Для цього підставимо вираз (10) для у граничну умову (2):

$$\frac{\partial \Phi_{11}}{\partial \varphi} = -m_q \sum_{q=0}^{\infty} \left[ A_q J_{m_q}(kr) + B_q N_{m_q}(kr) \right] \times$$

$$\times \sin(m_q \varphi_0) = 0; \rightarrow \sin(m_q \varphi_0) = 0;$$

$$m_q \varphi_0 = \pi q; \rightarrow m_q = \frac{\pi q}{\varphi_0}.$$

Коефіцієнти  $u_n$  та  $w_n$  (4) мають визначатися на основі задоволення рівнянь (1) та умов спряження (5)-(7). З першого рівняння системи витікає наступний зв'язок між шуканими коефіцієнтами.

$$u_n = \frac{n(1 + \beta n^2)}{(\alpha \gamma \omega^2 - (1 + \beta)n^2)} w_n; \quad (11)$$

Підставивши (10) у друге рівняння системи (1) та провівши його перетворення, отримаємо:

$$\sum_{n=0}^{\infty} R_n w_n \cos(n\varphi) - \left. \begin{aligned} & -i\omega \frac{\alpha}{h} \left( \rho_2 \sum_{q=0}^{\infty} \left[ A_q J_{m_q}(k_2 r_2) + B_q N_{m_q}(k_2 r_2) \right] \cos(m_q \varphi) - \right. \\ & \left. - \rho_1 \sum_{m=0}^{\infty} E_m J_m(k_1 r_1) \cos(m\varphi) \right) \end{aligned} \right\} = -\frac{e_{31} r_0 \Psi_0}{c_{11}^E h};$$

де

$$R_n = \frac{\alpha^2 \gamma^2 \omega^4 - \alpha \gamma \omega^2 (1 + \beta n^2)(n^2 + 1) + \beta n^2 (n^2 + 1)^2}{(\alpha \gamma \omega^2 - (1 + \beta)n^2)}.$$

З умов (5), (6), (8) та (9) витікає ряд алгебраїчних рівнянь.

З умови (5):

$$\sum_{m=0}^{\infty} E_m J_m'(k_1 r_1) \cos(m\varphi) = i c_1 \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos(n\varphi), 0 \leq |\varphi| \leq \pi.$$

З умови (6):

$$\sum_{q=0}^{\infty} \left[ A_q J_{m_q}'(k_2 r_2) + B_q N_{m_q}'(k_2 r_2) \right] \cos(m_q \varphi) = i c_2 \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos(n\varphi), 0 \leq |\varphi| \leq \varphi_0.$$



Умова (8) дає :

$$\sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)}(k_2 r_3) \cos(s\varphi) = \sum_{q=0}^{\infty} \left[ A_q J_{m_q}(k_2 r_3) + B_q N_{m_q}(k_2 r_3) \right] \cos(m_q \varphi),$$

$$|\varphi| \leq \varphi_0.$$

З умови (9) маємо :

$$\left\{ \begin{aligned} & w_n \left( R_n + \frac{\alpha \omega \rho_1 c_1}{h} \frac{J_n(k_1 r_1)}{J_n'(k_1 r_1)} \right) N_n - i \omega \frac{\alpha}{h} \rho_2 \sum_{q=0}^{\infty} \left[ A_q J_{m_q}(k_2 r_2) + B_q N_{m_q}(k_2 r_2) \right] N_{nq} = - \frac{e_{31} r_0 \Psi_0}{h c_{11}^E} b_n; \dots n = 0, 1, 2, 3, \dots; \\ & \left[ A_q J_{m_q}'(k_2 r_2) + B_q N_{m_q}'(k_2 r_2) \right] N_q - i c_2 \sum_{n=0}^{\infty} w_n N_{nq} = 0; q = 0, 1, 2, 3, \dots; \\ & F_s H_s^{(1)}(k_2 r_3) N_s - \sum_{q=0}^{\infty} \left[ A_q J_{m_q}(k_2 r_3) + B_q N_{m_q}(k_2 r_3) \right] N_{sq} = 0, s = 0, 1, 2, 3, \dots; \\ & \left[ A_q J_{m_q}'(k_2 r_3) + B_q N_{m_q}'(k_2 r_3) \right] N_q - \sum_{n=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)'}(k_2 r_3) N_{sq} = 0; q = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \right. \quad (12)$$

де нові коефіцієнти мають вигляд:

$$N_n = \begin{cases} 2\pi, n = 0 \\ \pi, n \neq 0. \end{cases} \quad N_n = \begin{cases} \varphi_0, s = m_q; \\ \frac{2m_q (-1)^{q+1} \cos(s\varphi_0)}{s^2 - m_q^2}, s \neq m_q. \end{cases}$$

$$N_n = \begin{cases} \varphi_0, n = m_q; \\ \frac{2m_q (-1)^{q+1} \cos(n\varphi_0)}{n^2 - m_q^2}, n \neq m_q. \end{cases}$$

$$N_q = \begin{cases} 2\varphi_0, m_q = 0; \\ \varphi_0, m_q \neq 0. \end{cases} \quad \tilde{A}_q = A_q J_{m_q}(k_2 r_3),$$

$$N_s = \begin{cases} 2\pi, s = 0; \\ \pi, s \neq 0. \end{cases} \quad \tilde{B}_q = B_q J_{m_q}(k_2 r_3),$$

$$\tilde{F}_s = F_s H_s^{(1)}(k_2 r_3).$$

Згідно рекомендації [1] проведемо регуляризацію системи (12) шляхом введення наступної заміни невідомих  $A_q, B_q, F_s$  новими невідомими:

Отримаємо нову нескінченну систему алгебраїчних рівнянь :

$$\left\{ \begin{aligned} & w_n \left( R_n + \frac{\alpha \omega \rho_1 c_1}{h} \frac{J_n(k_1 r_1)}{J_n'(k_1 r_1)} \right) \cdot N_n - i \omega \frac{\alpha}{h} \rho_2 \sum_{q=0}^{\infty} \left[ \tilde{A}_q \frac{J_{m_q}(k_2 r_2)}{J_{m_q}(k_2 r_3)} + \tilde{B}_q \frac{N_{m_q}(k_2 r_2)}{N_{m_q}(k_2 r_3)} \right] N_{nq} = - \frac{e_{31} n \Psi_0}{h c_{11}^E} b_n; n = 0, 1, 2, 3, \dots; \\ & \left[ \tilde{A}_q \frac{J_{m_q}'(k_2 r_2)}{J_{m_q}(k_2 r_3)} + \tilde{B}_q \frac{J_{m_q}'(k_2 r_2)}{N_{m_q}(k_2 r_3)} \right] N_q - i c_2 \sum_{n=0}^{\infty} w_n N_{nq} = 0; q = 0, 1, 2, 3, \dots; \\ & \tilde{F}_s \frac{H_s^{(1)}(k_2 r_3)}{H_s^{(1)'}(k_2 r_3)} N_s - \sum_{q=0}^{\infty} \left[ \tilde{A}_q + \tilde{B}_q \right] N_{sq} = 0, s = 0, 1, 2, 3, \dots; \\ & \left[ \tilde{A}_q \frac{J_{m_q}'(k_2 r_3)}{J_{m_q}(k_2 r_3)} + \tilde{B}_q \frac{N_{m_q}'(k_2 r_3)}{N_{m_q}(k_2 r_3)} \right] N_q - \sum_{n=0}^{\infty} \tilde{F}_s N_{sq} = 0; q = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \right.$$

Ця система може бути розв'язана методом редукції або методом послідовних наближень.

В залежності від частоти та кута розкриття звуковий тиск на поверхні оболонки випромінювача може бути розраховано згідно виразу :

$$p(r_2 \varphi) = -i \omega \rho_2 \Phi_{II}.$$

Характеристика направленості визначається співвідношенням

$$R(\varphi) = \frac{\Phi_{III}(\varphi)}{\max \Phi_{III}(\varphi)},$$



$$\text{де } \Phi(\varphi) = \sum_{S=0}^{\infty} F_S e^{-iS\frac{\pi}{2}} \cos S\varphi.$$

Наведені результати дозволять одержати необхідні кількісні значення параметрів акустичних і механічних полів, які необхідно знати при виконанні проектних робіт по створенню електроакустичних перетворювачів згідно з заданими вимогами.

#### ВИСНОВКИ

Методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях одержані аналітичні співвідношення для розрахунків акустичних полів, що формуються циліндричним п'єзокерамічним перетворювачем з акустичним екраном у вигляді незамкнутого кільцевого шару з жорсткими властивостями. Розв'язок задачі випромінювання звуку зведено до розв'язку методом редуції нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Одержані теоретичні співвідношення становлять базу для виконання проектних робіт по створенню приладів для практичної реалізації акустичних технологій управління поведінкою живих істот.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Z. G. Gusak, A. G. Lejko, N. V. Derepa, V. S. Didkovskij, *Fizicheske polya priemoizluchayushhikh sistem p'zokeramicheskikh e'lektroakusticheskikh preobrazovatelej. T.1. Czilindricheskie preobrazovateli s vneshnim akusticheskim ekranom.*, K.: Vid.di'm. D.Burago, 2019, p. 309.
- [2] Grinchenko V. T., Vovk I. V., Maczipura V. T., *Osnovi akustiki*, K.: Nauk. dumka, 2007, p. 640.
- [3] Grinchenko V. T., Vovk I. V., Macypura V. T., *Volnovye zadachi akustiki*, K.: Interservis, 2013.-572 c.
- [4] Aronov B. S., «Piezoelectric circular ring flexural transducer,» *JASA*, № 2, p. 1021 – 1030, 2013 – v.134.  
DOI: [10.1121/1.4812760](https://doi.org/10.1121/1.4812760)
- [5] Aronov B., Bachand C., Brown D. A., «Analysis of the piezoelectric properties of tangentially polarized ,stripe – electrode cylinders.» *JASA*, no 1, pp. 2960-2967, 2011-v.129.  
DOI: [10.1121/1.3533736](https://doi.org/10.1121/1.3533736)
- [6] Gusak Z. T., Lejko A. G., «O chastotnykh harakteristikah elektricheskikh polej cilindricheskoj pezokeramicheskoy anteny s ekranom v vide ne zamknutogo kolcevogo sloya,» *Zhurn. Nanota elektronnoy fiziki*, т. 8, № 1, pp. 01029-1-01029-6, 2016.  
DOI: [10.21272/jnep.8\(1\).01029](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01029)
- [7] Vovk I. V., Macypuraa V. T., «Izluchenie zvuka otkrytym pezokeramicheskim kolcom v blizi ekranov konechnykh razmerov,» *Akust. vicnik*, vol. 7, no. 2, pp. 25-35, 2004.  
URL: [http://hydromech.org.ua/content/pdf/av/av-07-2\(25-35\).pdf](http://hydromech.org.ua/content/pdf/av/av-07-2(25-35).pdf)
- [8] Shenderov E. L., *Izluchenie i rasseivanie zvuka*, M.: Sudostroenie, 1989, p. 301.
- [9] Korzhik A. V., Ovsyanik V. P., Popsuj E. V., Filimonova M. Yu., «Elektromehanicheskie harakteristiki priyomnogo cilindricheskogo preobrazovatelya, razmeshyonogo v kolcevom sloe,» *Elektronika i svyaz*, № 2, pp. 109-114, 2013.  
DOI: [10.20535/2312-1807.2013.18.2.186875](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2013.18.2.186875)
- [10] Didkovskij V. S., Poroshin S. M ta in., *Konstruyuvannya elektroakustichnih priladiv i sistem dlya multimedijnih akustichnih tehnologij.*, Harkiv: NTU, 2013, p. 390.
- [11] Grinchenko V. T., Ulitko A. F., Shulga M. A., *Mehanika svyazannykh polej v elementah konstrukcii.* Vol.5. Elektro-urugost., K.: Naukova dumka, 1989, p. 280.

Надійшла до редакції 30 травня 2019 р.

УДК 534.2

## Излучение звука цилиндрическим пьезокерамическим преобразователем с радиальной поляризацией и жестким экраном

Шишкова К. А., ORCID [0000-0002-8564-5582](https://orcid.org/0000-0002-8564-5582)

Лейко А. Г., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)

Кафедра акустики и акустоэлектроники [acoustic.kpi.ua](http://acoustic.kpi.ua)

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» [kpi.ua](http://kpi.ua)

Киев, Украина

**Аннотация**—Рассмотрена акустическая антенна, отражатель которой выполнен в виде акустически жесткого экрана, а источником звука является цилиндрический пьезокерамический преобразователь с радиальной поляризацией. Высота излучателя считается бесконечно большой, поэтому распределение скоростей равномерное. Внутренняя объем преобразователя заполнен вакуумом или газом. Задача излучения звука такой антенной решена



Copyright (c) 2019 Шишкова К. А., Лейко О. Г.



с использованием методов связанных полей и частичных областей. Все физические поля антенны представлены в виде разложения в ряды Фурье, коэффициенты которых определяются в результате решения дифференциальных уравнений, описывающих электроупругие колебания пьезокерамического преобразователя и волновые процессы в акустических средах, контактирующих с ним. Решение задачи излучения звука сведено к решению методом редукции бесконечной системы линейных алгебраических уравнений.

*Ключевые слова* — звуковые поля; цилиндрический пьезокерамический преобразователь, акустически жесткий экран.

UDC 534.2

# Radiation of Sound by Cylindrical Piezoceramic Converter with Radial Polarization and Rigid Screen

K. A. Shyshkova, ORCID [0000-0002-8564-5582](https://orcid.org/0000-0002-8564-5582)

O. H. Leiko, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)

Department of Acoustics and Acoustoelectronics [acoustic.kpi.ua](http://acoustic.kpi.ua)

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” [kpi.ua](http://kpi.ua)

Kyiv, Ukraine

**Abstract**—In this paper, the acoustic antenna was disassembled, the reflector of which was made in the form of an acoustically rigid screen, and the sound source is a cylindrical piezoceramic converter with radial polarization. The height of the radiator is infinitely large, so the velocity distribution is uniform. The internal volume of the converter is filled with vacuum or gas, and radial polarization is realized by applying the electrodes on the cylindrical surfaces of the shell. The electrodes of the shell are brought into harmoniously changing time electric voltages and frequencies. The thickness of the rings of the cylindrical converter is taken much less than the average radius. We believe that the height of the emitter is infinitely large, so the distribution of the oscillation velocity along the height of the emitter is homogeneous.

Analytical relations were described that describe the acoustic fields of cylindrical piezoceramic converters with rigid acoustic screens in the form of unclosed annular torus. The problem of the radiation of sound with such an antenna was solved using the methods of bound fields and partial regions. All physical antenna fields are represented in the form of decompositions in Fourier series, the coefficients of which are determined as a result of the solution of differential equations describing the electroshock oscillations of the piezoceramic converter and the wave processes in acoustic media in contact with it. The boundary conditions are formulated for the inner and outer walls of the screen, and also the electric field strength in the shell material, which describes the operation of the screened converter, is taken into account. That is, on the surface of the converter in contact with the medium, the equation of the normal displacement of the surface of the piezoceramic shell and the oscillatory velocity of the particles of the medium, both external - working and internal, located inside the converter, is formed. The complete system of output ratios of the task includes the conditions for conjugation of sound fields at the boundaries of the division of regions and boundary conditions on the outer surface of the screen. According to the boundary conditions, the potential of the acoustic field velocity created by the converter was presented, because of the velocity potential in each of these regions. The solution of the problem of sound radiation is reduced to the solution by the reduction method of an infinite system of linear algebraic equations. The paper presents the analytical relations of sound pressure on the surface of the emitter shell, depending on the frequency and angle of the opening, as well as the expression for determining the characteristics of the direction of cylindrical piezoceramic converters with rigid acoustic screens.

**Keywords** — sound fields; cylindrical piezoceramic converter, acoustically rigid screen.

