

УДК 534.232

ШИШКОВА К. А., КОЗАК А. В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

НАПРАВЛЕНІ ВЛАСТИВОСТІ КРУГОВОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ПЛОСКИМ ЕКРАНОМ В ДІАМЕТРАЛЬНІЙ ПЛОЩИНІ

Мета. Дослідження направлених властивостей кругового циліндричного п'єзокерамічного перетворювача з плоским екраном в діаметральній площині. Основні етапи дослідження включають розгляд конструкції цього перетворювача та запропоновану нову схему побудови, розрахунки і аналіз результатів використання плоского акустично м'якого екрану для поліпшення випромінювальних характеристик, а також визначення впливу розміру екрану на діаграму направленості та імпеданс випромінювання.

Методика дослідження включала в себе застосування методу зв'язаних полів у багатозв'язних областях для визначення акустичних полів екранованого перетворювача. На основі цього методу було отримано аналітичні співвідношення для акустичних полів та нормований вираз діаграми направленості та імпедансу.

Проведено розрахунки та аналіз кількісних результатів використання плоского акустично м'якого екрану у циліндричних перетворювачах з метою поліпшення їх випромінювальних характеристик. Запропоноване розміщення екрану в діаметральній площині перетворювача забезпечує рівномірне випромінювання в широкому секторі просторових кутів і малий рівень випромінювання звуку в певному напрямку. Це дозволяє створити максимальну випромінюючу поверхню перетворювача і забезпечити односторонню направленість його випромінювання. Крім того, екранований перетворювач має майже незмінний імпеданс випромінювання порівняно з неекранованим, що спрощує узгодження з електронним генератором.

Результати. Отримані результати свідчать про те, що розміщення плоского акустично м'якого екрану в діаметральній площині перетворювача дозволяє досягти рівномірного випромінювання в широкому секторі просторових кутів та низького рівня випромінювання в конкретному напрямку. Ця особливість дозволяє створити максимальну випромінюючу поверхню перетворювача та забезпечити односторонню направленість випромінювання. Крім того, встановлено, що розмір екрану та дифракційні процеси мають важливий вплив на характеристики перетворювача.

Практична значимість цього дослідження полягає в можливості покращити випромінювальні характеристики циліндричних перетворювачів шляхом використання акустично м'якого екрану. Це може бути корисним у багатьох галузях, де важлива одностороння направленість випромінювання, таких як розробка сонарів, медичних ультразвукових пристроїв, військова та оборонна техніка та інші застосування, де важливо досягти оптимальних акустичних характеристик.

Ключові слова: круговий циліндричний перетворювач; плоский екран; діаметральна площина; хвильові розміри; направлені властивості.

Вступ. Акустика та акустичні прилади набули широкого застосування на початку 20-го століття. На той час їх застосування було виключно військового характеру – різноманітні системи протиповітряної оборони (ППО), відслідковування субмарин, пошук та встановлення об'єктів за допомогою гідролокації, тощо. У післявоєнний період використання акустичних приладів та систем набуло промислового характеру – пошук та встановлення місцесховищ корисних копалин, рибальство, кораблебудування, розвиток теле-та радіо-бачення і багато іншого.

На сьогодні акустичні системи та прилади представляють високотехнологічні пристрої, здатні відтворювати звук різного типу і відповідно різного призначення. Найбільш широкого

розповсюдження набули прилади акустичної локації, котрі застосовуються, як в цивільній сфері (акустична та гідролокація під час наукових досліджень та надзвичайних ситуацій), так і у військовій (протиснайперські комплекси) та може бути віднесена до технологій подвійного призначення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В практичній електроакустиці значне поширення знайшли локаційні системи, акустичні антени яких виконані у вигляді кругових циліндричних антен [1–3]. При цьому у якості перетворювачів використовуються екрановані циліндричні електромеханічні коливальні системи. Вони являють собою герметизовані п'єзокерамічні кільця, покриті ззовні акустичним екраном м'якого типу, виконаним у вигляді незамкнутого кільцевого шару кінцевої товщини. Ця товщина вибирається в залежності від робочої частоти і рівня гідростатичного тиску, в умовах яких працює акустична антена [4, 5]. При цьому особливість застосованого акустичного екрану полягає в тому, що при зникненні робочої частоти локаційної системи товщина екрану повинна збільшуватися. В свою чергу збільшення товщини екрануючого шару в циліндричних перетворювачах кругової антени обумовлює необхідність збільшення міжцентрової відстані між перетворювачами. Але з точки зору формування заданих направлених властивостей акустичної антени відстань між центрами перетворювачів не повинна перевищувати $d \leq 0.65\lambda$, де λ – довжина робочої хвилі гідроакустичного сигналу.

Постановка Завдання. При побудові кругових антен для низькочастотних локаційних систем, ліквідація встановленого вище недоліку може здійснюватися трьома шляхами: використанням стержньових перетворювачів [7]; зміною схеми побудови кругової циліндричної антени по типу, запропонованому в роботі [5]; зміною схеми екранування циліндричного перетворювача [4].

Розглянемо більш детально останню пропозицію, фізична модель якої наведена на рис. 1. Екранований циліндричний перетворювач складається із п'єзокерамічного циліндра 1 і акустичного екрану 2.

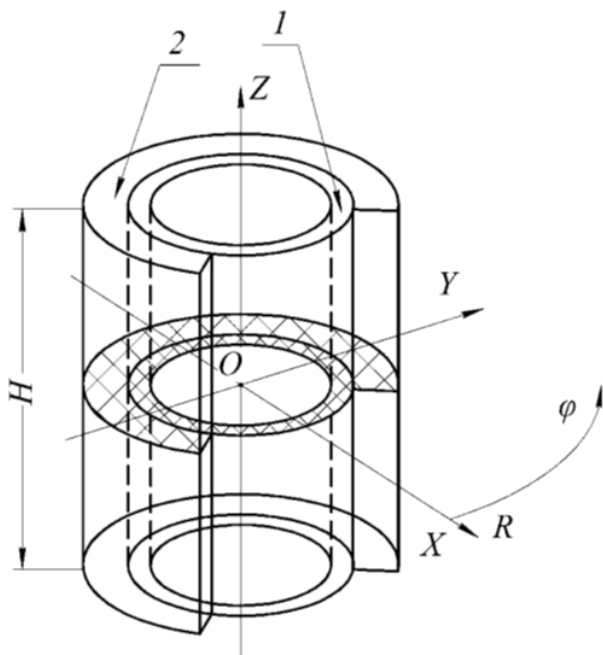


Рис. 1. Фізична модель екранованого перетворювача, де 1 – електроакустичний перетворювач; 2 – акустичний екран, виконаний у вигляді незамкнутого кільцевого шару

Останній може бути виконаний у вигляді плоского акустично м'якого екрану малої товщини, розміщеного в діаметральній площині перетворювача. З точки зору перетворення енергії така схема побудови перетворювача збільшує його акустичне навантаження завдяки збільшенню площі випромінюючої поверхні. Це дозволяє суттєво збільшити його смугу резонансних частот, що важливо для локаційних систем. З точки зору формування акустичного поля така фізична модель побудови перетворювача забезпечує його переважне одностороннє випромінювання енергії зі сторони, протилежної екрану.

Методика та матеріали. Визначимо акустичні поля циліндричного п'єзокерамічного перетворювача з екраном в діаметральній площині. Розрахункова модель екранованого перетворювача (рис. 2), яка відповідає фізичній моделі (рис. 1), складається із кругового циліндричного випромінювача 1 з окружною поляризацією та тильного екрану. Внутрішня порожнина п'єзокерамічної оболонки випромінювача товщиною h може бути вакуумована, заповнена газом або рідиною з густиною ρ_1 та швидкістю звуку c_1 .

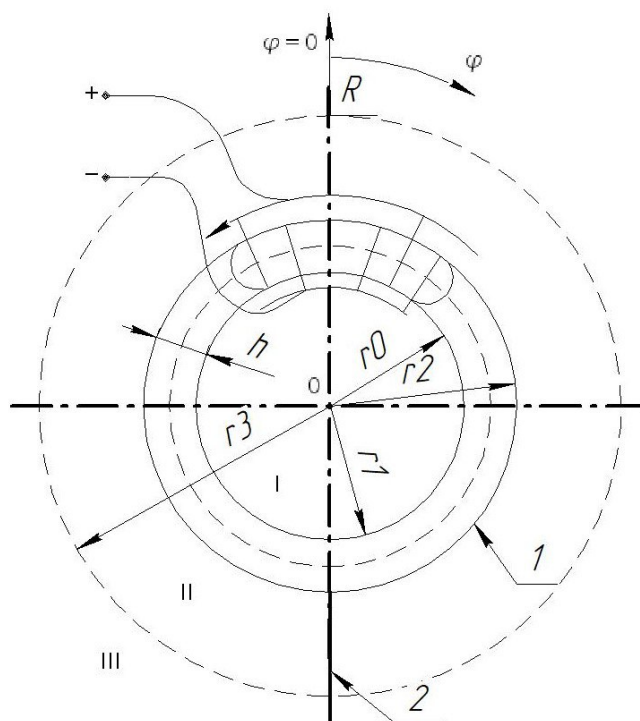


Рис. 2. Розрахункова модель екранованого перетворювача

Окружна поляризація реалізується шляхом побудови оболонки з жорстко склеєних між собою N п'єзокерамічних призм, котрі електрично увімкненні паралельно. До електродів призм підводиться електрична напруга, що гармонічно змінюється у часі $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$ частотою ω , де i – уявна одиниця. Тонкий тильний екран антени виконаний з акустично м'якого матеріалу. Антена розташована в середовищі з густиною ρ та швидкістю звуку c .

Зауважимо, що на відміну від радіолокаційних антен акустичні антени виконують дві функції – функцію перетворення енергії і функцію формування енергії в оточуючих середовищах. При випромінюванні звукової енергії електрична енергія збудження випромінювачів акустичної антени спочатку перетворюється в механічну енергію коливань електромеханічних коливальних систем перетворювачів. Ці механічні коливання перетворювачів збуджують коливальні процеси в середовищах, що оточують ці перетворювачі, завдяки чому в них поширюється акустична енергія.

Кожна з цих функцій має свої особливості. Особливістю функції перетворення енергії в перетворювачах, побудованих із п'єзокераміки, є взаємодія електричних, механічних та акустичних полів [9]. Формування акустичної енергії в оточуючих акустичні антени середовищах теж має свої акустичні особливості, фізичною основою яких є багатократне перевідбиття від елементів конструкцій антен і перетворювачів випромінених і відбитих звукових хвиль [10]. Цей процес отримав назву акустичної взаємодії. І, нарешті, функції перетворення енергії та її формування теж пов'язані між собою завдяки присутності в кожній з них акустичних полів [3].

В математичному відношенні при визначенні акустичних полів необхідно враховувати всі визначені вище види взаємодій: фізичних полів при перетворенні енергії, акустичної взаємодії при її формуванні та взаємодії процесів перетворення формування енергії. Це врахування може бути здійснено шляхом сумісного розв'язку диференціальних рівнянь, що описують відповідні процеси.

З урахуванням припущень, що висота антени перевищує 5–7 довжин хвиль [4] при введених системах координат (рис. 2) акустичне поле розглянутого перетворювача визначається через спільне вирішення:

Рівняння вимушеної електростатики для п'єзокераміки

$$\vec{E} = -\nabla\psi, \quad \text{div}\vec{D} = 0.$$

Рівняння руху тонких оболонок з окружною поляризацією в переміщеннях

$$\begin{aligned} (1 + \beta) \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} - \beta \frac{\partial^3}{\partial \varphi^3} &= \alpha \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ -\frac{\partial u}{\partial \varphi} + \beta \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) - w - \frac{e_{33}^{33}}{C_{33}^E} r_0 \frac{n}{2\pi} \frac{\psi_0}{r_0} + & \\ \frac{\alpha}{h} q_r = \alpha \gamma \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} & \end{aligned} \quad (1)$$

Рівняння Геймгольца, що описує рух середовищ всередині та зовні випромінювача

$$\Delta\Phi + k^2\Phi = 0,$$

де \vec{E} та \vec{D} – вектори напруженості та індукції електричного поля; Δ – оператор Лапласа; Φ – потенціал швидкості; k – хвильові числа зовнішнього та внутрішнього середовищ; u, w – тангенціальна та нормальна складові вектору зміщення точок серединної поверхні оболонки; $b = \frac{h^2}{12r_0^2} \left(1 + \frac{e_{33}^2}{C_{33}^E \varepsilon_{33}^S} \right)$; $\alpha = \frac{r_0^2}{C_{33}^E}$; q – зовнішнє навантаження; $C_{33}^E; \varepsilon_{33}^S; e_{33}$ – модуль пружності при нульовій електричній напруженості, діелектрична проникність при нульовій деформації, п'єзоконстанта відповідно; γ – густина матеріалу п'єзокерамічної оболонки випромінювача.

Граничні умови на поверхні приймають вигляд $\Phi = 0, |\varphi| = \pi, r_2 \leq r \leq r_3$. Електричні умови зводяться до задання напруженості електричного поля в п'єзокерамічній оболонці $E_\varphi = -\psi_0 N / (2\pi r_0)$. Ці умови доповнюються умовами випромінювання на нескінченності.

Розіб'ємо всю область існування фізичного поля антени на три часткові області I, II, III (рис. 2). Тоді повна система вихідних співвідношень задачі буде містити наступні умови поєднання полів на кордоні розділу областей:

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial \Phi_I}{\partial r} &= \frac{\partial w}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r = r_1, \\
 -\frac{\partial \Phi_{II}}{\partial r} &= \frac{\partial w}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r = r_2, \\
 q_r &= -\left(\rho \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial t} - \rho_1 \frac{\partial \Phi_I}{\partial t} \right), \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r = r_2, \\
 \Phi_{III} &= \Phi_{II}, \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r = r_3, \\
 \frac{\partial \Phi_{III}}{\partial r} &= \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial r}, \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r = r_3
 \end{aligned} \tag{2}$$

Представимо шукані величини u, w, Φ у вигляді розкладів рядів Фур'є по відповідним функціям:

$$\begin{aligned}
 u &= \sum_{n=0}^{\infty} u_n \sin(n\varphi), \quad w = \sum_{n=0}^{\infty} u_n \cos(n\varphi), \\
 \Phi_I &= \sum_{n=0}^{\infty} E_n J_n(kr) \cos(n\varphi), \\
 \Phi_{II} &= \sum_{q=0}^{\infty} \left[A_q J_{m_q}(kr) + B_q N_{m_q}(kr) \cos(m_q \varphi) \right], \\
 \Phi_{III} &= \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)}(kr) \cos(s\varphi),
 \end{aligned} \tag{3}$$

де $J_n(kr), N_n(kr), H_s^{(1)}(kr)$ – традиційні позначення функцій Бесселя, Неймана, Ханкеля першого роду відповідно; $m_q = (2q + 1) / 2$ – визначається з граничної умови на екрані.

Алгебраїзація системи рівнянь (1), (2) на основі співвідношень (3) та відповідних властивостей повноти та ортогональності власних кутових функцій з урахуванням вигляду m_q приводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases}
 w_n \left(R_n + \frac{\alpha \omega \rho_1 c_1}{h} \frac{J_n(k_1 r_1)}{J_n'(k_1 r_1)} \right) N_n - i \omega \frac{\alpha}{h} \rho_2 \sum_{q=0}^{\infty} \left[A_q J_{m_q}(k_2 r_2) + B_q N_{m_q}(k_2 r_2) \right] N_{nq} = \\
 = -\frac{e_{33}}{C_{11}^E} \frac{n \psi_0}{2\pi} b_n; n = 0, 1, 2, 3, \dots \\
 \left[A_q J_{m_q}'(k_2 r_2) + B_q N_{m_q}'(k_2 r_2) \right] N_q - i c_2 \sum_{n=0}^{\infty} w_n N_{nq} = 0; q = 0, 1, 2, 3, \dots \\
 F_s H_s^{(1)}(k_2 r_3) N_s - \sum_{q=0}^{\infty} \left[A_q J_{m_q}(k_2 r_3) + B_q N_{m_q}(k_2 r_3) \right] N_{sq} = 0, s = 0, 1, 2, 3, \dots \\
 \left[A_q J_{m_q}'(k_2 r_3) + B_q N_{m_q}'(k_2 r_3) \right] N_q - \sum_{n=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)}(k_2 r_3) N_{sq} = 0; q = 0, 1, 2, 3, \dots
 \end{cases} \tag{4}$$

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

$$N_n = \begin{cases} 2\pi, n = 0; \\ \pi, n \neq 0. \end{cases}$$

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

$$N_q = \begin{cases} 2\varphi_0, m_q = 0; \\ \varphi_0, m_q \neq 0. \end{cases};$$

$$N_s = \begin{cases} 2\pi, s = 0; \\ \pi, s \neq 0. \end{cases};$$

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

Ця система використовується для визначення не відомих коефіцієнтів розкладу $u_n, w_n, E_n, A_q, B_q, F_s$ і є вихідною для отримання кількісних даних про акустичні поля п'єзокерамічного перетворювача.

Використаємо отримані аналітичні співвідношення для встановлення направлених та імпедансних властивостей досліджуваного перетворювача. З урахуванням виразу (3) наближені значення нормованої діаграми направленості екранованого перетворювача приймуть вигляд

$$R(\varphi) = \frac{\left| \sum_{n=0}^M F_s e^{j\frac{\pi}{2}n} \cos n\varphi \right|}{\left| \sum_{n=0}^M F_s e^{j\frac{\pi}{2}n} \cos n\varphi_{\max} \right|},$$

де φ_{\max} – напрям максимальної інтенсивності випромінювання; M – рівень редукції нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення коефіцієнтів розкладу в ряди Фур'є механічних та акустичних полів

Імпеданс випромінювача на одиницю висоти перетворювача визначається виразом:

$$Z = \frac{j\omega\rho r_0}{v_0} \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} \Phi_1 v_0 f(\varphi) d\varphi, \quad (5)$$

де ρ – густина рідини зовнішнього середовища. Маючи вираз (3) для потенціалу швидкості Φ_1 , вираз (5) можливо привести до вигляду:

$$Z = \rho c S_{\text{длс}} [R' + jX'],$$

де c – швидкість звуку в середовищі; $S_{\text{длс}} = 2r_0\varphi_0$ – площа випромінюючої поверхні на одиницю висоти.

$$R' = \frac{1}{\pi\varphi_0 r_0} \sum_{q=0}^{\infty} A_q^R \frac{2}{\pi} L_q \frac{N_q}{N'_{m_q}(kr_0)};$$

$$X' = -\frac{1}{2\varphi_0 r_0} \sum_{q=0}^{\infty} \left[A_q^R \frac{2}{\pi} + r_0 L_q N'_{m_q}(kr_0) \right] \frac{L_q N_q}{N'_{m_q}(kr_0)};$$

$$A_q^R = \text{Re } A_q; A_q^I = \text{Im } A_q;$$

Величини R' та X' представляють собою безрозмірні активну та реактивну вкладові імпедансу випромінювання.

Результати. На основі отриманих співвідношень виконаємо чисельний аналіз направлених та імпедансних властивостей перетворювача з екраном, що розглядається. Розрахунки виконувалися для випадку перетворювача з вакуумованим внутрішнім об'ємом при збудженні на нульовій моді коливань наступних значеннях хвильових розмірів: $kr_2 = 4,52; 3,14; 2,26; 1,57; kr_3 = 17,96$. Досліджувалися в залежності від хвильових розмірів; діаграми направленості; сектор основного випромінювання $\theta_{0,7}$; нерівномірність діаграми в межах кута $\theta_{0,7}$ і рівень тильної пелюстки σ_τ . Результати розрахунків представлені на рис 3 і 4. Графіки рис 3 демонструють кутову залежність в дальній зоні нормованих амплітуд звукового тиску.

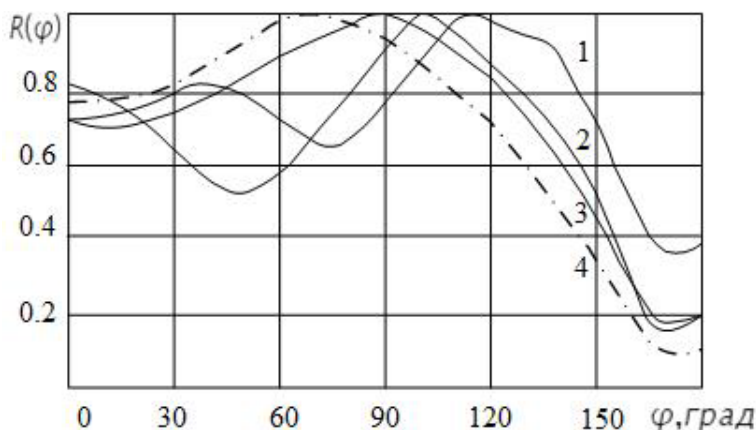


Рис. 3. Кутова залежність направлених властивостей перетворювача з екраном

Криві 1, 2, 3, 4 відповідають послідовно наведеним вище значенням kr_2 . Криві рис. 4 показують залежності сектору $\theta_{0,7}$ основного випромінювання (рис. 4а), нерівномірності L діаграми направленості в цьому секторі (рис. 4б) та рівня σ_τ тильної пелюстки цієї діаграми (рис. 4в) від хвильової ширини плоского екрана $\frac{r_3 - r_2}{\lambda}$.

Активна R' та реактивна X' безрозмірні складові імпедансу випромінювання визначалися для випадку $\frac{r_3}{r_2} = 2$ при збудженні випромінювача на нульовій моді його коливань. Результати розрахунків частотних залежностей представлені на рис. 5.

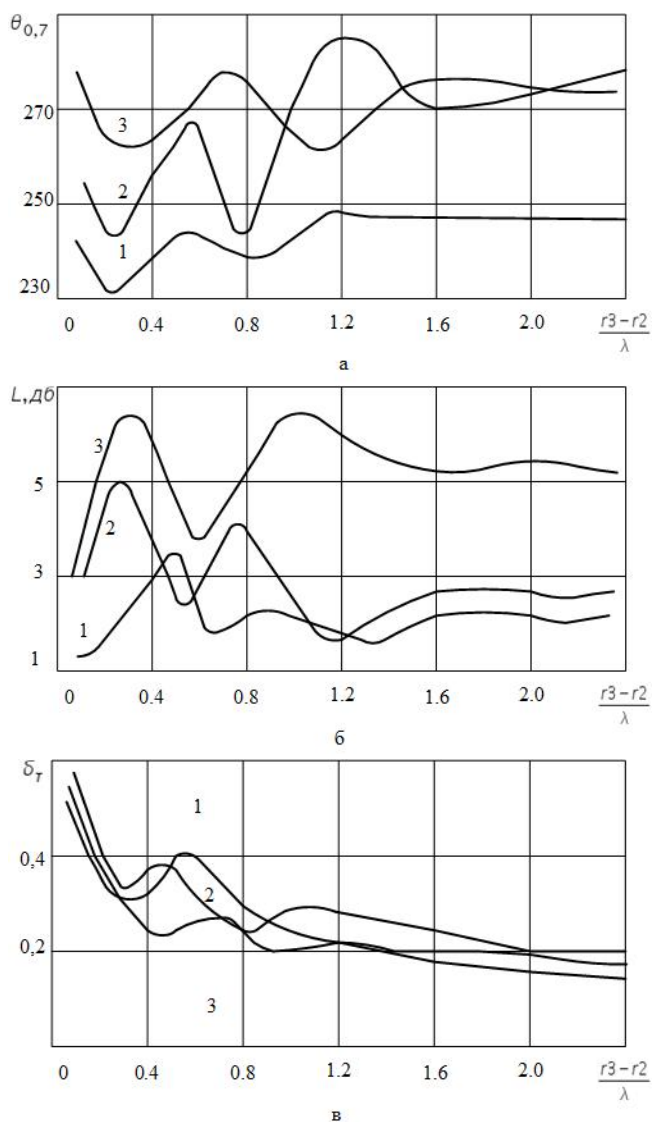


Рис. 4. Криві залежностей $\theta_{0,7}$ (а), L (б) та σ_τ (в) від хвильової ширини плоского екрана

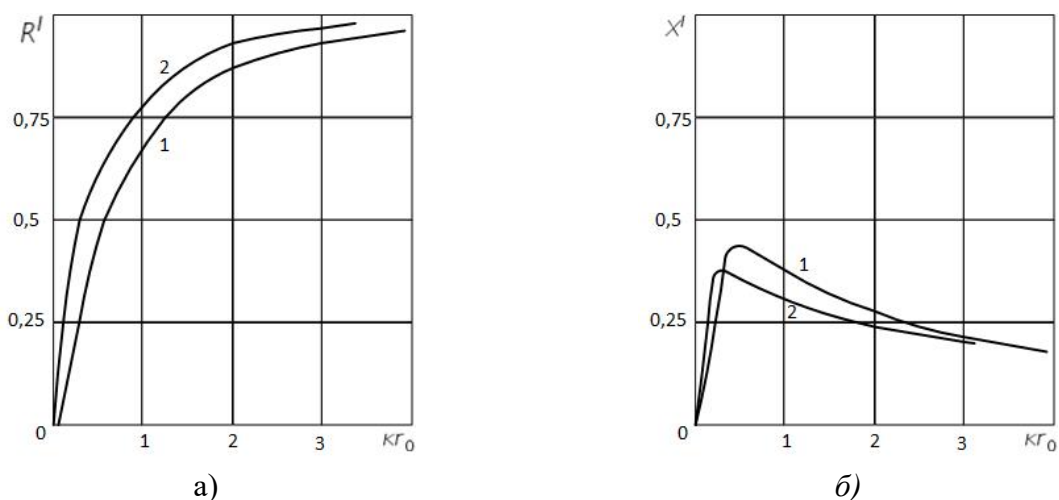


Рис. 5. Частотні залежності активної (а) та реактивної (б) безрозмірних складових імпедансу випромінювання на одиницю висоти випромінювача з екраном (криві 1) і без нього (криві 2)

Обговорення. Проаналізуємо отримані кількісні результати. Перш за все зауважимо, що запропоноване розміщення плоского акустично м'якого екрану в діаметральній площині циліндричного перетворювача забезпечує, по-перше такий важливий показник як відносно рівномірне випромінювання в широкому секторі просторових кутів і, по-друге, малий рівень випромінювання звуку в певному заданому напрямі. Таким чином, наведена схема екранування циліндричного перетворювача дозволяє створити не тільки максимальну випромінюючу поверхню перетворювача але й односторонню направленість його випромінювання. Зауважмо, що наведене забезпечує ще одну позитивну властивість екранованого перетворювача – його імпеданс випромінювання майже не змінюється порівняно з імпедансом не екранованого циліндричного перетворювача. Це важливо при узгодженні перетворювача із збуджуючим його електронним генератором. Аналіз кривих рис 3 свідчить про те, що діаграми направленості досліджуваного перетворювача є в певній мірі частково залежними. При цьому велика кривизна випромінюючої поверхні і великі хвильові розміри kr_2 , п'єзокерамічного циліндра формують тенденцію утворення провалу на вісі основної пелюстки діаграми направленості. Наведене є результатом досягнення суттєвої величини фазових викривлень, обумовлених циліндричною поверхню фронту звукової хвилі, утвореної екранованим перетворювачем.

Проаналізуємо тепер залежності величини сектору основного випромінювання $\theta_{0,7}$ нерівномірності L діаграми направленості в цьому секторі і рівня σ_r тильної пелюстки від хвильової ширини $\frac{r_3 - r_2}{\lambda}$ екрану. На рис. 4 криві 1, 2, 3 відповідають значенням $kr_2 = 1,57; 2,26; 3,14$. Аналіз наведених кривих свідчить про те, що до значень $\frac{r_3 - r_2}{\lambda} \leq 1$ має місце значна нерегулярність в поведінці величини $\theta_{0,7}$, L , σ_r . При цьому рівень тильної пелюстки залишається достатньо високим. Із зростанням хвильової ширини екрану значення величин $\theta_{0,7}$ і L стабілізуються, а рівень тильної пелюстки прямує до нуля. Така поведінка вказаних величин підтверджує той факт, що дифракційні процеси найбільш ярко проявляють себе та мають найбільш складний характер коли розмір екрану порівняний з довжиною хвилі.

Як вже відмічалось, виконання акустичного екрану у вигляді тонкої плоскої пластинки і розміщення його в діаметральній площині циліндричної випромінюючої оболонки дозволяє суттєво збільшити акустичне навантаження оболонки, наблизивши його до оболонки без екрана. Це підтверджується частотними залежностями складових імпедансу випромінювання (рис. 5). Співставлення їх для екранованого випромінювача (криві 1) і не екранованого (криві 2) свідчить про те, що вплив акустично м'якого екрану розглянутої конфігурації і розміщення на імпедансі випромінювання циліндричного випромінювача відносно малий. Це в свою чергу спрощує розв'язок технічних складностей, які виникають при побудові систем «електронний генератор – п'єзокерамічний перетворювач».

Висновки. Проаналізовані можливі шляхи збереження існуючих схем побудови кругових акустичних циліндричних антен при переході роботи локаційних систем в низький діапазон частот.

Запропонована нова схема побудови для цього перетворювача у вигляді кругової циліндричної оболонки та плоского акустично м'якого екрану, розміщеного в її діаметральній площині. Методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях розв'язана наскрізна задача випромінювання звуку таким екранованим перетворювачем. Отримані аналітичні співвідношення для акустичного поля використані при проведенні чисельних експериментів, що встановлюють частотні залежності направлених властивостей екранованого випромінювання

від хвильових розмірів плоского екрану. Визначені акустичні особливості кругового циліндричного перетворювача з акустичним екраном в діаметральній площині.

References

Література

1. Derepa, A. V., Leiko, A. G., Melenko, Yu. A. (2014). *Osnovy voenno-tehnicheskikh icsledovaniy. Teoriya i prilozheniya. T. 7. Kompleksnaja sistema "Osnovy voenno-tehnicheskikh isledovaniy. Teoriya i prilozheniya": monografija* [Fundamentals of military-technical research. Theory and applications. Vol. 7. Integrated system "Fundamentals of military-technical research. Theory and applications": monograph]. Kyiv: Publishing house D. Burago. 424 p. [in Russian].
1. Дерєпа А. В., Лейко А. Г., Меленко Ю. А. *Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Т. 7. Комплексная система "Основы военно-технических исследований. Теория и приложения": монография*. К.: Изд. дом Д. Бураго, 2014. 424 с.
2. Derepa, A. V., Leiko, A. G., Melenko, Yu. A. (2016). *Osnovy voenno-tehnicheskikh icsledovaniy. Teoriya i prilozheniya. T. 8. Kompleksnaja sistema "Osnovy voenno-tehnicheskikh isledovaniy. Teoriya i prilozheniya": monografija* [Fundamentals of military-technical research. Theory and applications. Vol. 8. Integrated system "Fundamentals of military-technical research. Theory and applications": monograph]. Kyiv: Publishing house D. Burago. 400 p. [in Russian].
2. Дерєпа А. В., Лейко А. Г., Меленко Ю. А. *Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Т. 8. Комплексная система "Основы военно-технических исследований. Теория и приложения": монография*. К.: Изд. дом. Д. Бураго, 2016. 400 с.
3. Didkovsky, V. S., Poroshin, S. M., Drozdenko, O. I. (2013). *Konstruiuvannia elektroakustychnykh prykladiv i system dlia multymediinykh akustychnykh tekhnolohii: navchalnyi posibnyk* [Design of electroacoustic devices and systems for multimedia acoustic technologies: initial handbook]. Kharkiv: FPP Amelyanchik. 390 p. [in Ukrainian].
3. Дідковський В. С., Порошин С. М., Дрозденко О. І. *Конструювання електроакустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій: навчальний посібник*. Х.: ФПП Амелянчик, 2013. 390 с.
4. Gusak, Z. T., Leiko, A. G., Derpna, A. V., Didkovsky, V. S. (2019). *Fizicheskie polja priemoizluchajushhih sistem p'ezokeramicheskikh cilindricheskikh preobrazovatelej s vneshnimi akusticheskim jekranom: monografija* [Physical fields of receiving-emitting systems of piezoceramic cylindrical transducers with external acoustic screen: monograph]. Kyiv: Publishing house V. Burago. 309 p. [in Russian].
4. Гусак З. Т., Лейко А. Г., Дерєпа А. В., Дідковський В. С. *Физические поля приемозлучающих систем пьезокерамических цилиндрических преобразователей с внешними акустическим экраном: монография*. К.: Изд. дом В. Бураго, 2019. 309 с.
5. Starovoyt, Y. I., Leiko, O. G., Derepa, A. V., Bogdanov, O. V. (2022). *Ob`iemni systemy z tsylindrychnymy p'iezokeramichnymy vuprominiuvachamy i ekranom: monografija* [Volumetric systems with cylindrical petroceraamic vipromonitors and a screen: monograph]. Kyiv: Publishing House D. Burago. 293 p. [in Ukrainian].
5. Старовойт Я. І., Лейко О. Г., Дерєпа А. В., Богданов О. В. *Об`ємні системи з циліндричними п`езокерамічними випромінювачами і екраном: монографія*. К.: Изд. дом Д. Бураго, 2022. 293 с.
6. Grinchenko, V. T., Vovk, I. V. (1986). *Volnovye zadachi rassejaniya zvuka na uprugih obolochkah: monografija* [Wave problems of sound scattering on elastic shells: monograph]. Kyiv: Nauk. dumka. 24 p. [in Russian].
6. Гринченко В. Т., Вовк І. В. *Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках: монография*. К.: Наук. думка, 1986. 24 с.
7. Kocharyan, O. O. (2021). *Metodyka otsinky vplyvu stryzhnevyykh peretvoriuvachiv na znachennia osnovnykh pokaznykiv anten zminnoi hlybiny korabelnykh hidroakustychnykh stantsii: dysertatsiia kand. tekhn. nauk*. [Methodology for assessing the influx of jet transformers on the values of the main indicators of the antennas of the
7. Кочарян О. О. *Методика оцінки впливу стрижневих перетворювачів на значення основних показників антен змінної глибини корабельних гідроакустичних станцій: дисертація канд. техн. наук*. К., 2021.

seabed hydroacoustic stations: Ph. D. dissertation technical sciences]. Kyiv [in Ukrainian].

8. Gusak, Z. T., Leiko, A. G. (2016). Chastotnye svojstva jelektricheskikh polej cilindricheskoj gidroakusticheskoj anteny s ploskim jekranom v diametral'noj ploskosti [Frequency properties of electric fields of a cylindrical hydroacoustic antenna with a flat screen in the center plane]. *Izv. vuzov. Radioelektronika = Izv. universities Radioelectronics*, No. 6 (59), P. 38–46 [in Russian].

9. Grinchenko, V. T., Ulitko, A. F., Shulga, N. A. (1989). *Mekhanika svyaznih polej v jelementah konstrukcii. T. 5. Jelektrouprugost': monografija* [Mechanics of connected fields in structural elements. Vol. 5. Electroelasticity: monograph]. Kyiv: Nauk. dumka. 280 p. [in Russian].

10. Leiko, A. G., Shamarin, Yu. E., Tkachenko, V. P. (2000). *Podvodnye akusticheskie anteny. Metody rascheta zvukovyh polej: monografija* [Underwater acoustic antennas. Methods for calculating sound fields: monograph]. Kyiv: Avanpostprim. 320 p. [in Russian].

8. Гусак З. Т., Лейко А. Г. Частотные свойства электрических полей цилиндрической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 2016. № 6 (59). С. 38–46.

9. Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А. *Механика связных полей в элементах конструкции. Т. 5. Электроупругость: монография*. К.: Наук. думка, 1989. 280 с.

10. Лейко А. Г., Шамарин Ю. Э., Ткаченко В. П. *Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей: монография*. К.: Аванпостприм, 2000. 320 с.

SHYSHKOVA KATERYNA

Post graduate student,
Department of Acoustic and
Multimedia Electronic Systems,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8564-5582>
E-mail: ket199406@gmail.com

KOZAK ANDRII

Post graduate student,
Department of Acoustic and
Multimedia Electronic Systems,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4756-7931>
Scopus Author ID: 57214137197
E-mail: andrekaka1996@gmail.com

SHYSHKOVA K. A., KOZAK A. V.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

DIRECTIONAL PROPERTIES OF A CIRCULAR CYLINDRICAL PIEZOCERAMIC TRANSDUCER WITH A FLAT SCREEN IN THE DIAMETRICAL

Purpose. *The primary objective of this study is to comprehensively investigate the directional properties of a circular cylindrical piezoceramic transducer equipped with a flat screen in its diametrical plane. The research aims to assess the feasibility of enhancing the transducer's radiating characteristics through the implementation of this novel design.*

Methodology. *The methodology employed in this research involved the utilization of the coupled field method in composite regions to determine analytical relationships for the acoustic fields generated by the screened transducer. This approach allowed for the derivation of normalized expressions for the radiation pattern and impedance. Extensive calculations and quantitative analyses were conducted to evaluate the efficacy of integrating a flat acoustically soft screen into cylindrical transducers. This assessment focused on improving their radiation properties.*

Findings. *The study revealed several significant findings. Firstly, the placement of a flat acoustically soft screen in the diametrical plane of the transducer resulted in uniform radiation across a broad spatial angle sector and minimized sound radiation in specific directions. This innovation enabled the creation of a larger radiating surface for the transducer and facilitated unidirectional radiation. Moreover, the screened transducer demonstrated minimal alterations in radiation impedance when compared to its unshielded counterpart, simplifying the matching process with electronic generators.*

The research also examined the relationship between the screen's wavelength and key parameters, such as the size of the main radiation sector, the nonuniformity of the radiation pattern within this sector, and

the level of backlobe radiation. It was observed that increasing the screen's wavelength led to stabilization in the values of these parameters and a reduction in backlobe radiation. This highlighted the substantial influence of diffraction processes, particularly when the screen size approached the wavelength.

Furthermore, the introduction of an acoustic screen in the form of a thin flat plate in the transducer's diametrical plane significantly enhanced the acoustic loading of the cylindrical radiating shell, nearly matching that of an unshielded shell. Frequency dependencies of the radiation impedance components further emphasized the screen's minimal impact on the transducer's radiation impedance.

Originality. This research introduces an innovative design for cylindrical transducers by incorporating a flat acoustically soft screen, leading to improved radiation characteristics. The analysis of diffraction processes and their impact on key parameters contributes to the originality of the study. Additionally, the research emphasizes the importance of screen size and its influence on transducer performance.

Practical Value. The practical significance of this study lies in its potential to enhance the radiating properties of cylindrical transducers, making them more efficient for applications where directional radiation is crucial. This innovation has relevance in diverse fields such as sonar technology, medical ultrasound devices, defense equipment, and various other applications where optimizing acoustic characteristics is essential. Additionally, the simplified matching process with electronic generators facilitates practical implementation in real-world systems.

Keywords: circular cylindrical converter; flat screen; diametrical plane; wave dimensions; directional properties.