

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.1\(29\).64-70](https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.1(29).64-70)
УДК 623.983

О. М. ПОЗДНЯКОВА, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>

А. В. ДЕРЕПА, доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0001-7334-2237>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

І. О. ЛАСТІВКА, доктор технічних наук,
професор

<https://orcid.org/0000-0001-5226-9819>
(Національний авіаційний університет, м. Київ)

А. О. ЛЕЙКО, кандидат фізико-математичних наук

<https://orcid.org/0000-0002-9363-9270>
(Державне підприємство «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів», м. Київ)

О. І. ДРОЗДЕНКО, кандидат технічних наук,
доцент

<https://orcid.org/0000-0001-6647-1428>

А. К. ОСАДЧА, бакалавр

<https://orcid.org/0000-0002-9548-1921>
(Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ)

ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗВУКУ ЦИЛІНДРИЧНИМ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИМ ГІДРОАКУСТИЧНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ З ДИНАМІЧНО КЕРОВАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Запропонована схема побудови циліндричного п'єзокерамічного гідроакустичного перетворювача, параметрами якого можна динамічно керувати в процесі експлуатації за допомогою оперативної зміни амплітуд і фаз електричного збудження зовнішньої та внутрішньої асиметрично розміщених п'єзокерамічних оболонок перетворювача. Методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях розв'язана наскрізна задача випромінювання звуку таким перетворювачем та одержані аналітичні співвідношення для кількісної оцінки параметрів його акустичних, механічних і електричних динамічних полів.

Ключові слова: п'єзокерамічний перетворювач складної конструкції, динамічне електричне збудження.

ВСТУП

Багатофункціональність сучасних гідроакустичних станцій (ГАС) обумовлює необхідність управління параметрами гідроакустичних антен та перетворювачів, які входять до складу ГАС. Такими параметрами є: направлені властивості, випромінювані потужності, резонансні частоти тощо. Саме вони визначають головні показники ефективності ГАС – її дальність виявлення цілей та кутові координати знаходження цілей [1 – 5]. На сьогоднішній день існують два методи управління цими параметрами – пасивні та активні.

Найбільше поширення знайшли пасивні методи [6 – 13]. До них в першу чергу відноситься застосування акустичних екранів різного типу в конструкціях гідроакустичних антен і перетворювачів [7, 14 – 17]. Це можуть бути як зовнішні, так і внутрішні акустичні екрани. Пасивні методи зарекомендували себе як дуже ефективні, але вони мають один суттєвий недолік – неможливість або конструкційна складність оперативного управління параметрами антен та перетворювачів в процесі їх роботи.

Як відомо [3, 4, 8, 10], гідроакустичні перетворювачі мають дві сторони – електричну і механічну. Це дає можливість віднести до активних методів управління їх параметрами оперативну зміну електричної напруги збудження перетворювачів в процесі їх роботи. Але для такої можливості перетворювач повинен мати певну конструктивну схему побудови. Одна із таких схем побудови описана і досліджена в роботах [16, 18, 19]. Її недоліком є відсутність можливості управління направленіми властивостями циліндричного п'єзокерамічного випромінювача.

Метою роботи є пропозиція зміни схеми побудови циліндричного п'єзокерамічного випромінювача і розв'язок наскрізної задачі випромінювання звуку циліндричним п'єзокерамічним випромінювачем з несиметричним розміщенням внутрішньої п'єзокерамічної оболонки в ньому.

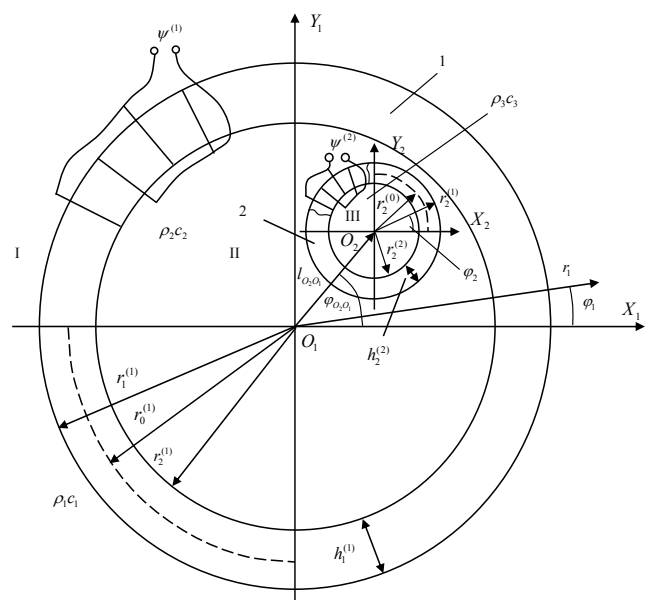


Рис. 1. Нормальний переріз випромінювача

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Визначимо динамічну поведінку перетворювача, утвореного з двох п'єзокерамічних циліндричних оболонок – зовнішньої 1 та внутрішньої 2 (рис. 1), поздовжні вісі яких паралельні і рознесені між собою на відстань $l_{o_2o_1}$. Простір між оболонками 1 і 2 заповнений пружним середовищем. Внутрішній об'єм оболонки 2 може бути вакуумований, заповнений газом або рідиною. Кожна із оболонок утворена із $M_s, s=1, 2$ жорстко з'єднаних, електрично паралельно включених призм і збуджується гармонічним електричним сигналом напругами $\psi_1^{(1)} = \psi_1^{(1)} e^{-i\omega t}$ (перша оболонка) і $\psi_2^{(2)} = \psi_2^{(2)} e^{-i(\omega t - a)}$ (друга оболонка), де $\psi_1^{(1)}$ і $\psi_2^{(2)}$ – амплітуди збуджень, а a – зсув фаз між ними. Перша оболонка має середній радіус $r_1^{(1)}$ і товщину $h_1^{(1)}$, друга оболонка має середній радіус $r_2^{(2)}$ і товщину $h_1^{(1)}$. Товщини оболонок малі в порівнянні з їх радіусами.

Перетворювач розміщений в безмежному середовищі з хвильовим опором $\rho_1 c_1$, а об'єми між оболонками 1 і 2 і всередині другої оболонки заповнені пружними середовищами $\rho_2 c_2$ і $\rho_3 c_3$ відповідно, де ρ_j і c_j ($j=1, 2, 3$) – густина та швидкість звуку у відповідних середовищах.

Для розв'язку задачі випромінювання звуку введемо локальні декартові і кругові циліндричні координати, пов'язані з кожною із оболонок: $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ і $r_1 \varphi_1 z_1$ – для зовнішньої ($s=1$) оболонки та $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ і $r_2 \varphi_2 z_2$ – для внутрішньої ($s=2$) оболонки. Простір існування звукового поля перетворювача поділимо на 3 часткові області ($j=1, 2, 3$): зовнішню ($j=1$), внутрішню між оболонками ($j=2$) та внутрішню другої оболонки ($j=3$).

В досліджуваному перетворювачі кожна із оболонок виконує дві функції – перетворення енергії і формування акустичної енергії в оточуючих середовищах. Особливістю першої функції для п'єзокерамічних оболонок є зв'язаність електричного, механічного і акустичного полів [20]. Особливість другої функції полягає у взаємодії акустичних полів першої і другої оболонок в міжоболонковому ($j=2$) просторі, пов'язаній з багатократним обміном між ними випроміненими і відбитими звуковими хвилями. Саме наявність акустичного поля в обох цих особливостях пов'язує між собою процеси перетворення енергії і форму-

вання її як в кожній із п'єзокерамічних оболонок, так і перетворювачі в цілому.

В математичному плані наведені особливості фізичної моделі перетворювача обумовлюють необхідність сумісного розв'язку при пошуку аналітичних співвідношень, що описують фізичні поля перетворювача, системи диференціальних рівнянь, яка включає:

– рівняння Гельмгольца, що описує коливальний рух середовищ всередині і зовні перетворювачів системи:

$$\Delta \Phi_j^{(s)} + k_j \Phi_j^{(s)} = 0, \quad j=1, 2, 3; \quad (1)$$

– рівняння руху тонких п'єзокерамічних оболонок з окружною поляризацією в переміщеннях:

$$(1 + \beta_s) \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial w^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta_s \frac{\partial^3 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} = a_s \gamma_s \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial t^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial t^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta_s \left(\frac{\partial^3 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - w^{(s)} + \frac{e_{33s} r_s}{C_{33s}^E} E_{\varphi s} + \frac{a_s}{h_s} q_s = a_s \gamma_s \frac{\partial^2 w^{(s)}}{\partial t^2}; \quad s=1, 2,$$

– рівняння вимушеної електростатики для п'єзокераміки:

$$\vec{E}_s = -\text{grad } \psi_s; \quad \text{div } \vec{D}_s = 0. \quad (3)$$

Тут: j – номер області існування акустичного поля; Δ – оператор Лапласа; $\Phi_j^{(s)}$ – потенціал швидкостей S -ї оболонки в j -й області; k_s – хвильове число середовища в j -й області; $u^{(s)}$ і $w^{(s)}$ – окружна та радіальна складові вектора зміщень точок серединної поверхні S -ї оболонки;

$\beta_s = h_s^2 / 12 r_s \left(1 + e_{33s}^2 / C_{33s}^E \varepsilon_{33s}^{(s)} \right)$; $a_s = r_s^2 / C_{33s}^E$; q_{rs} – зовнішнє радіаційне навантаження S -ї оболонки; C_{33s}^E , e_{33s} , $\varepsilon_{33s}^{(s)}$, γ_s – відповідно модуль пружності при нульовій електричній напрузі, п'єзоконстанта, діелектрична проникність при нульовій деформації, густина матеріалу S -ї п'єзокерамічної оболонки; \vec{E}_s і \vec{D}_s – вектори напруги та індукції електричного поля в S -ій оболонці.

Для конкретизації цих загальних рівнянь, згідно з фізичною постановкою задачі, їх необхідно доповнити умовами спряження акустичних полів на границях часткових областей та оболонок та електричними умовами.

Умови спряження акустичних полів набувають вигляду:

$$-\frac{\partial \Phi_1^{(1)}(k_1, r_1, \varphi)}{\partial r_1} = \frac{\partial w^{(1)}}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r_1 = r_1^{(1)} = r_{10} + \frac{h_1}{2};$$

$$-\frac{\partial \Phi_2^{(1)}(k_2, r_1, \varphi)}{\partial r_1} = \frac{\partial w^{(1)}}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r_1 = r_2^{(1)} = r_{10} - \frac{h_1}{2}; \quad (4)$$

$$-\frac{\partial \Phi_2^{(2)}(k_2, r_2, \varphi_2)}{\partial r_2} = \frac{\partial w^{(2)}}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi_2| \leq \pi, \quad r_2 = r_2^{(2)} = r_{20} + \frac{h_2}{2};$$

$$-\frac{\partial \Phi_3^{(2)}(k_3, r_2, \varphi_2)}{\partial r_2} = \frac{\partial w^{(2)}}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi_2| \leq \pi, \quad r_2 = r_2^{(2)} = r_{20} - \frac{h_2}{2}.$$

$$\sigma_{r_1} = -q_{r_1} = -\left[p_1(k_1 r_1^{(1)}) - p_2(k_2 r_2^{(1)}) \right], \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi;$$

$$\sigma_{r_2} = -q_{r_2} = -\left[p_2(k_2 r_1^{(2)}) - p_3(k_3 r_2^{(2)}) \right], \quad 0 \leq |\varphi_2| \leq \pi. \quad (5)$$

Тут σ_{r_1} і σ_{r_2} – нормальні складові тензорів механічних напруг першої і другої оболонок перетворювача; $p_1 = -i\omega\rho_1\Phi_1(k_1 r_1 \varphi)$, $p_2 = -i\omega\rho_2\Phi_2(k_2 r_2^{(2)} \varphi_2)$, $p_3 = -i\omega\rho_3\Phi_3(k_3 r_2^{(2)} \varphi_2)$ – акустичні тиски у відповідних областях.

Електричні граничні умови полягають в заданні напруги електричного поля в кожній із п'єзокерамічних оболонок і для їх окружних поляризацій мають вигляд:

$$E_{\varphi S} = -\frac{\psi_S M_S}{2\pi r_S}, \quad S=1, 2. \quad (6)$$

РОЗВ'ЯЗОК НАСКРІЗНОЇ ЗАДАЧІ

Представимо зміщення оболонок у вигляді

$$u^{(S)} = \sum_n u_n^{(S)} e^{in\varphi_S}; \quad w^{(S)} = \sum_n w_n^{(S)} e^{in\varphi_S}, \quad S=1, 2. \quad (7)$$

Акустичні потенціали швидкості в областях $j = 1, 2, 3$ представимо відповідно виразами: в зовнішній області ($j = 1$)

$$\Phi_1^{(1)}(k_1 r_1, \varphi_1) = \sum_n A_n^{(1)} H_n^{(1)}(k_1 r_1 \varphi_1) e^{in\varphi_1}; \quad (8)$$

$$R_g^{(1)} w_g^{(1)} + \frac{\alpha_1}{h_1} i\omega \left\{ \rho_1 A_g H_g(k_1 r_1^{(1)}) - \rho_2 \sum_m \left[B_m J_g(k_2 r_2^{(1)}) + C_m N_g(k_2 r_2^{(1)}) \right] \Delta_{m-g} \right\} = \frac{e_{331}}{C_{331}^E} \cdot \frac{\psi^{(1)} M_1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} e^{i\theta\varphi_1} \partial\varphi_1;$$

$$w_g^{(1)} = -\frac{i}{c_1} A_g H_g^{(1)}(k_1 r_1^{(1)}); \quad (9)$$

$$w_g^{(1)} = -\frac{i}{c_2} \sum_m \left[B_m J_g'(k_2 r_2^{(1)}) + C_m N_g'(k_2 r_2^{(1)}) \right] \Delta_{m-g};$$

$$R_n^{(2)} w_n^{(2)} + \frac{\alpha_2}{h_2} i\omega \left\{ \rho_2 \left[B_n J_n(k_2 r_1^{(2)}) + C_n N_n(k_2 r_1^{(2)}) \right] - \rho_3 D_n J_n(k_3 r_2^{(2)}) \right\} = -\frac{e_{332}}{C_{332}^E} \cdot \frac{\psi^{(2)} M_2}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} e^{i\theta\varphi_2} \partial\varphi_2;$$

у внутрішній області ($j = 2$) між оболонками $\Phi_2^{(2)}(k_2 r_2, \varphi_2) = \sum_m \left[B_m J_m(k_2 r_2) + \sigma_m(k_2 r_2) \right] e^{im\varphi_2}; \quad (9)$

у внутрішній області другої оболонки ($j = 3$)

$$\Phi_3^{(2)}(k_3 r_3, \varphi_2) = \sum_\chi D_\chi J_\chi(k_3 r_2) e^{i\chi\varphi_2}. \quad (10)$$

У другій частковій області ($j = 2$) поле представлено в локальних координатах другої ($S=2$) оболонки. В той же час граничні умови на межі $r_1 = r_{12}$ задані в локальних координатах першої ($S=1$) оболонки. Перенос систем координат здійснюється на основі теорем складання для циліндричних хвильових функцій [21]. При $r_1 > l_{O/O}$ маємо:

$$J_m(k_2 r_2) e^{im\varphi_2} = \sum_n J_{m-n}(k_2 l_{O_2 O_1}) e^{i(m-n)\varphi_{O_2 O_1}} J_n(k_2 r_1) e^{in\varphi_2}; \quad (11)$$

$$N_m(k_2 r_2) e^{im\varphi_2} = \sum_n J_{m-n}(k_2 l_{O_2 O_1}) e^{i(m-n)\varphi_{O_2 O_1}} N_n(k_2 r_1) e^{in\varphi_1}.$$

Тоді в координатах (r_1, φ_1) поле $\Phi_2^{(2)}(k_2 r_1, \varphi_1)$ має вигляд:

$$\Phi_2^{(2)}(k_2 r_1, \varphi_1) = \sum_m \sum_n \left[B_m J_n(k_2 r_1) + C_m N_n(k_2 r_1) \right] J_{m-n}(k_2 l_{O_2 O_1}) e^{i(m-n)\varphi_{O_2 O_1}} e^{in\varphi_1} =$$

$$= \sum_m \sum_n \left[B_m J_n(k_2 r_1) + C_m N_n(k_2 r_1) \right] \Delta_{m-n}^{(2,1)} e^{in\varphi_1}, \quad (12)$$

$$\text{де } \Delta_{m-n}^{(2,1)} = J_{m-n}(k_2 l_{O_2 O_1}) e^{i(m-n)\varphi_{O_2 O_1}}.$$

Алгебраїзація системи функціональних рівнянь (1) – (6) з використанням співвідношень (7) – (12) дозволяє одержати на основі властивостей повноти і ортогональності функцій $e^{in\varphi}$ на інтервалі $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ наступну еквівалентну їй нескінчену систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$w_n^{(2)} = -\frac{i}{c_2} \left[B_n J'_n(k_2 r_1^{(2)}) + C_n N'_n(k_2 r_1^{(2)}) \right];$$

$$w_n^{(2)} = -\frac{i}{c_3} D_n J'_n(k_3 r_2^{(2)}); \quad \mathcal{G} = -\infty, 0, \infty;$$

$$n = -\infty, 0, \infty.$$

В виразах (13) маємо:

$$R_r^{(S)} = \frac{\tau^2 (1 + \beta_s \tau^2)^2}{\tau^2 (1 + \beta_s \tau^2) - \alpha_s \gamma_s \omega^2} - [1 + \beta_s \tau^4 - \alpha_s \gamma_s \omega^2], \quad S = 1, 2;$$

τ приймає значення n і \mathcal{G} ;

$$\Delta_{m-g} = J_{m-g}(k_2 l_{O_2 O_1}) e^{i(m-\tau)\varphi_{O_2 O_1}}; \quad \text{«штрих» означає}$$

похідну від функції по аргументу r_1 .

Всі члени виразу (13) мають ясні фізичні значення. Вільні члени визначають радіально симетричне збудження кожної з двох п'єзокерамічних оболонок на нульовій моді їх механічних коливань. Наявність суми в матричних елементах характеризує взаємодію між п'єзокерамічними оболонками по акустичному полю у внутрішній порожнині гідроакустичного перетворювача. В цю суму входить множник Δ_{m-g} , залежний від відстані між оболонками. Він описує вплив взаємодії між звуковими хвилями n -го і \mathcal{G} -го порядків на акустичне поле в міжоболонковому просторі гідроакустичного перетворювача. Наявність множників $J_1(k_2 r_2^{(S)})$ і $N_g(k_2 r_2^{(S)})$, $S = 1, 2$ та їх похідних свідчить відповідно про випромінювання і відбиття випромінених хвиль зовнішньою і внутрішньою оболонками перетворювача. Коефіцієнти $R_r^{(S)}$, $S = 1, 2$; описують зв'язок між радіальними і тангенціальними зміщеннями в кожній із п'єзокерамічних оболонок гідроакустичного перетворювача.

Розв'язок нескінченної системи (13) лінійних алгебраїчних рівнянь методом редукції або методом послідовних наближень дозволяє визначити з заданою точністю кількісні значення коефіцієнтів розкладання фізичних полів досліджуваного гідроакустичного перетворювача, а потім і кількісні значення самих цих полів. Розрахункові вирази для отримання кількісних значень виглядають наступним чином.

Для механічних полів гідроакустичного перетворювача з динамічно керованими параметрами коливальні швидкості його п'єзокерамічних оболонок визначаються співвідношеннями:

– для швидкості радіальних коливань

$$\frac{\partial w^{(S)}}{\partial t} = -i\omega w^{(S)};$$

– для швидкості обводових коливань

$$\frac{\partial u^{(S)}}{\partial t} = -i\omega u^{(S)},$$

де $w^{(S)}$ і $u^{(S)}$ описуються виразами (7).

Для акустичних полів досліджуваного перетворювача звуковий тиск на поверхні зовнішньої оболонки визначається виразом (8), а на зовнішній поверхні внутрішньої оболонки – виразом (9).

Електричні струми $J^{(S)}$ збудження оболонок можливо обрахувати для оболонок з окружною поляризацією згідно із співвідношеннями [17, 20]:

$$J^{(S)} = S_{\text{aes}} \sum_{j=1}^{M_S} \frac{\partial D_{\varphi_s}^{(j)}}{\partial t};$$

$$\frac{\partial D_{\varphi_s}^{(j)}}{\partial t} = -i\omega \left\{ -\varepsilon_{33}^{(j)} \frac{\varphi_s M_S}{2\pi r_s} + \frac{e_{33}^{(j)}}{r_s} \left[\sum_n i n u_n^{(S)} e^{in \frac{2\pi j}{M_S}} \right] \right\},$$

$$S = 1, 2;$$

Тут S_{aes} – площа поверхні електроду призми одиничної довжини S -ї оболонки; $\partial D_{\varphi}^{(S)}$ – обводова складова електричної індукції S -ї оболонки.

Вхідний електричний опір кожної із оболонок гідроакустичного перетворювача визначається законом Ома.

ВИСНОВКИ

Проаналізовані існуючі підходи до управління параметрами гідроакустичних антен та перетворювачів, які входять до складу гідроакустичних станцій. Показано, що використання електричної сторони перетворювачів є основою оперативних методів динамічного керування параметрами гідроакустичних перетворювачів. Для цього запропонована нова схема побудови гідроакустичного перетворювача у вигляді двох симетрично розміщених п'єзокерамічних оболонок різного діаметра – зовнішньої і внутрішньої з паралельними поздовжніми вісями і заповненим рідиною міжоболонковим простором. Методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях виконано розв'язок наскрізної задачі випромінювання таким гідроакустичним перетворювачем з урахуванням зв'язаності фізичних полів в кожній із п'єзокерамічних оболонок при перетворенні енергії і взаємодії оболонок по внутрішньому акустичному полю гідроакустичного перетворювача. Одержані розрахункові вирази для подальшої кількісної оцінки параметрів акустичних, механічних і електричних полів при оперативній зміні амплітуд і фаз електричних напруг, збуджуючих п'єзокерамічні оболонки гідроакустичних перетворювачів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука. 2005. 410 с.
- Дерепа А.В., Джаназян В.В., Лейко О.Г., Дрозденко О.И. Сучасні підходи до конструювання гідроакустичних антен корабельних гідроакустичних станцій. Озброєння та військова техніка. 2019. № 2(22). С. 93–98. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.2\(22\).41-48](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.2(22).41-48).
- Aronov, B.S. Tetsuro, O. & David, A.B. (2002). Methods of experimental investigation of acoustic interaction between electroacoustical transducers in the array. *J. of Acoustic Society of America*. Vol. 112. No. 2. Pp. 753–763. <https://doi.org/10.1121/1.4779832>.
- Sherman, C.H. & Butler, J.L. *Transducers and Arrays for Underwater Sound*. (2007). New York, Springer-Verlag Publ. 680 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-33139-3>.
- Родионов А.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Наука в России. 2003. № 3. С. 67–70.
- Коржик О.В., Чайка О.С., Ніжинська В.В., Богданова Н.В., Позднякова О.М., Курдюк С.В. До питання розв'язку задач випромінення звуку сферою в обмежені рідинних просторах хвильового типу. Озброєння та військова техніка. 2020. № 3(27). С. 85–94. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.3\(27\).85-94](https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.3(27).85-94).
- Коржик А.В. Звукопрозрачность замкнутого кольцевого слоя в сквозной задаче излучения звука цилиндрическим источником нулевого порядка. *Электроника и связь*. 2013. № 3. С. 49–55.
- Naida, S., Didkovsky, V. & Zaets, V. (2019). Experimental Study into the Helmholtz Resonators Resonance Properties over a Broad Frequency Bandm. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*. No 1/5 (97). Pp. 34–39. <https://doi.org/15587/1729-4061.2019.155417>.
- Меленко Ю.Я. Акустические свойства цилиндрического пьезокерамического излучателя разгруженной конструкции. *Электроника и связь*. 2014. № 3. С. 101–105.
- Аронов Б.С. *Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики*. Л.: Энергоатомиздат. 1990. 272 с.
- Zinkovskii, A.P. (1992). Distortion of the sinusoidalness of the form of vibrations systems with a disturbed rotary symmetry and the mode localization phenomenon. Report 1. *Strength Mater*. No 10. Pp. 613–620.
- Chepkov, I.B., Lapitskii, S.V., Zinkovskii, A.P., Leiko, A.G. & Derepa, A.V. (2019). Analysis of resonance states of the system of hydroacoustic piezoceramic radiators taking into account their interaction with the screen. *Strength Mater*. No 6. Pp. 25–35.
- Leiko, A., Derepa, A., Rasstrygin, A., Kosiakovskiy, A., Kocharian, O. & Starovoit, Y. (2019). Calculations of electric fields of circular screened systems, generated from cylindrical piezoceramic radiators. *The J. Archives of Acoustics*. No 44(1). Pp. 129–135.
- Дідковський В.С., Порошин С.М., Лейко О.Г., Лейко А.О., Дрозденко О.І. Конструювання акустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій. Київ: НТУУ «КПІ». 2013. 390 с.
- Гринченко В.Т., Вовк І.В., Мацьпура В.Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. Киев: Наук. думка. 1986. 240 с.
- Grinchenko, V.T., Vovk, I.V. & Matsypura, V.T. (2018). *Acoustic Wave Problems*. New York. Begell House. 439 p.
- Гусак З.Т., Лейко А.Г., Дерепа А.В., Дидковський В.С. Физические поля приемозлучающих систем пьезокерамических электроакустических преобразователей. Т. 1. Цилиндрические преобразователи с внешним акустическим экраном. Киев: Изд. дом Д. Бураро. 2019. 309 с.
- Bogdanova, N.V., Leiko, A.G., Naida, S.A. & Drozdenco, A.I. (2019). Cylindrical piezoceramic radiator as a complex dynamic system. *J. of Nano- and Electronic Physics*. Vol. 1. No. 6. 06011 (7 p). [https://doi.org/2077-6772/2019/11\(6\)06011\(7\)](https://doi.org/2077-6772/2019/11(6)06011(7)).
- Leiko, O., Derepa, A., Pozdniakova, O. & Bogdanova, N. On the Possibilities of Controlling the Dynamic Properties of Cylindrical Piezoceramic Radiators in Telecommunication Problems. (2020) *IEEE 40th Intern. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Pp. 694–699. <https://doi.org/101109/ELNANO/50318.2020.9088808>.
- Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость. Киев: Наукова думка. 1989. 280 с.
- Гузь А.Н., Головчан В.Т. Дифракция упругих волн в многосвязных телах. Киев: Наукова думка. 1972. 255 с.

REFERENCES

- Koryakyn, Yu.A., Smyrnov, S.A. & Yakovlev, H.V. (2005), "Korabelnaia hydroakusticheskaia tekhnika: sostoianye y aktualnye problemy" [Ship hydroacoustic equipment: state and current], *Nauka*, SPb. 410 p.
- Derepa, A.V., Dzanazian, V.V., Leiko, O.G. & Drozdenco, O.I. (2019). "Suchasni pidhody do konstruiuvannia gidroakustichnih antenn korabelnih gidroakustichnih stantsii" [Modern approaches to the design of sonar antennas for ship sonar stations]. *Weapons and military equipment*. No 2(22). Pp. 93–98. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.2\(22\).41-48](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.2(22).41-48).
- Aronov, B.S. Tetsuro, O. & David, A.B. (2002). Methods of experimental investigation of acoustic interaction between electroacoustical transducers in the array. *J. of Acoustic Society of America*. Vol. 112. No. 2. Pp. 753–763. <https://doi.org/10.1121/1.4779832>.
- Sherman, C.H. & Butler, J.L. *Transducers and Arrays for Underwater Sound*. (2007). New York, Springer-Verlag Publ. 680 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-33139-3>.

5. Rodyonov, A.A., Smyrnov, S.A. & Yakovlev, H.V. (2003). "Hydroakustyka na flotskoi sluzhbe" [Hydroacoustics in the naval service], *Nauka v Rossyy*. No 3. Pp. 67–70.
6. Korzhyk, O., Chaika, O., Nizhynska, V., Bogdanova, N., Pozdniakova, O. & Kurdiuk, S. (2020). Do pytannia rozviazku zadachi viprominennia zvuku sferoi v obmezhenih ridinnykh prostorah hvilevodnogo tipu [To the question of solving the problem of sound radiation in a limited liquid space of a waveguide type], *Weapons and military equipment*. No 3(27). Pp. 85–94. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.3\(27\).85-94](https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.3(27).85-94).
7. Korzhik, A.V. (2013). Zvukoprozrachnost zamknutogo kolcevogo sloia v skvoznoi zadache izlucheniia zvuka cilindricheskim istochnikom nulevogo poriadka [Acoustic transparency of a closed annular layer in the through problem of sound radiation by a cylindrical zero-order source]. *Elektronika i sviaz*. No 3. Pp. 49–55.
8. Naida, S., Didkovsky, V. & Zaets, V. (2019). Experimental Study into the Helmholtz Resonators Resonance Properties over a Broad Frequency Bandm. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*. No 1/5 (97). Pp. 34–39. <https://doi.org/15587/1729-4061.2019.155417>.
9. Melenko, J.J. Akusticheskie svoistva tsilindricheskogo pezoeramicheskogo izluchatelja razgruzhennoi konstruksii [Acoustic properties of a cylindrical piezoceramic emitter of unloaded design]. (2014), *Elektronika i svjaz*. No 3. Pp. 101–105.
10. Aronov, B.S. (1990). "Elektromechanicheskie preobrazovateli iz pezoelricheskoi keramiki" [Electromechanical transducers from piezoelectric ceramics], *Energoatomizdat*. L. 272 p.
11. Zinkovskii, A.P. (1992). Distortion of the sinusoidalness of the form of vibrations systems with a disturbed rotary symmetry and the mode localization phenomenon. Report 1. *Strength Mater*. No 10. Pp. 613–620.
12. Chepkov, I.B., Lapitskii, S.V., Zinkovskii, A.P., Leiko, A.G. & Derepa, A.V. (2019). Analysis of resonance states of the system of hydroacoustic piezoceramic radiators taking into account their interaction with the screen. *Strength Mater*. No 6. Pp. 25–35.
13. Leiko, A., Derepa, A., Rasstrygin, A., Kosiakovskiy, A., Kocharian, O. & Starovoit, Y. (2019). Calculations of electric fields of circular screened systems, generated from cylindrical piezoceramic radiators. *The J. Archives of Acoustics*. No 44(1). Pp. 129–135.
14. Didkovskiy, V.S., Poroshyn, S.M., Leiko, O.H., Leiko, A.O. & Drozdenko, O.I. (2013). "Konstruiuvannia akustychnykh pryladiv i system dlja multymediinykh akustychnykh tekhnolohii" [Design of acoustic devices and systems for multimedia acoustic technologies], NTUU «KPI». K. 390 p.
15. Hrynchenko, V.T., Vovk, Y.V. & Matsypura, V.T. (1986). "Volnovye zadachy rasseianyia zvuka na upruhykh obolochkakh" [Wave problems of sound scattering by elastic shells], *Naukova dumka*. K. 240 p.
16. Grinchenko, V.T., Vovk, I.V. & Matsypura, V.T. (2018). *Acoustic Wave Problems*. New York. Begell House. 439 p.
17. Gusak, Z., Leiko, A., Derepa, A. & Didcovsky, V. (2019). "Fyzycheskye polia pryemoyzluchaiushchykh system pezoeramicheskyykh elektroakustycheskyykh preobrazovatelei. T. 1. Tsylyndrycheskye preobrazovately s vneshnym akustycheskym ekranom" [Physical fields of transceiver systems of piezoceramic electroacoustical transducers. V. 1. Cylindrical transducers with outer acoustic screen], *Burago Publ. House*. K. 309 p.
18. Bogdanova, N.V., Leiko, A.G., Naida, S.A. & Drozdenko, A.I. (2019). Cylindrical piezoceramic radiator as a complex dynamic system. *J. of Nano- and Electronic Physics*. Vol. 1. No. 6. 06011 (7 p). [https://doi.org/2077-6772/2019/11\(6\)06011\(7\)](https://doi.org/2077-6772/2019/11(6)06011(7)).
19. Leiko, O., Derepa, A., Pozdniakova, O. & Bogdanova, N. On the Possibilities of Controlling the Dynamic Properties of Cylindrical Piezoceramic Radiators in Telecommunication Problems. (2020). *IEEE 40th Intern. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Pp. 694–699. <https://doi.org/101109/ELNANO/50318.2020.9088808>.
20. Grinchenko, V.T., Ulitko, A.F. & Shulga, N.A. (1989). "Mehanika svyazannykh poloi v elementah konstruksii" [Mechanics of related fields in construction elements], T. 5. *Elektroprugost*. *Naukova dumka*. K. 280 p.
21. Guz, A.N. & Golovchan, V.T., (1972). "Difrakciia uprugih voln v mnogosviaznykh telah" [Diffraction of elastic waves in multiply connected bodies], *Naukova dumka*. K. 255 p.

Pozdniakova O., Derepa A., Lastivka I., Leiko A., Drozdenko O., Osadcha A.

SOUND RADIATION BY CYLINDRICAL PIEZOCERAMIC HYDROACOUSTIC TRANSDUCER WITH DYNAMICALLY CONTROLLED PARAMETERS

The existing approaches to control of parameters of hydroacoustic antennas and transducers that are a part of hydroacoustic stations are analyzed. It is shown that the use of the electrical side of the transducers is the basis of operational methods of dynamic control of the parameters of hydroacoustic transducers. The scheme of construction of the cylindrical piezoceramic hydroacoustic transducer which parameters can be dynamically controlled in the course of operation by means of operative change of amplitudes and phases of electric excitation of external and internal asymmetrically placed piezoceramic covers of the transducer is offered. In such a transducer, each of the shells performs two functions – energy conversion and the formation of acoustic energy in the environment. A feature of the first function for piezoceramic shells is the

interconnection of electric, mechanical and acoustic fields. The peculiarity of the second function is the interaction of the acoustic fields of the first and second shells in the intershell space, associated with the repeated exchange between them of radiated and reflected sound waves. The presence of an acoustic field in both of these features connects the processes of energy conversion and its formation in each of the piezoceramic shells, as well as the transducers as a whole. The method of connected fields in multiconnected domains solves the end-to-end problem of sound radiation by such a transducer and analytical relations are obtained to quantify the parameters of its acoustic, mechanical and electrical dynamic fields. The calculated expressions for the further quantitative estimation of parameters of acoustic, mechanical and electric fields at operative change of amplitudes and phases of the electric voltages exciting piezoceramic covers of hydroacoustic transducers are received.

Keywords: piezoceramic transducer of complex design, dynamic electrical excitation.

Відомості про авторів:

Позднякова Ольга Миколаївна

кандидат технічних наук
молодший науковий співробітник науково-дослідного управління розвитку морських озброєнь та техніки Військово-Морських Сил
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>
e-mail: olpozdnjakova@gmail.com

Information about the authors:

Pozdniakova Olha

Candidate of Technical Sciences
Junior researcher of the Department of Armament and Military Equipment of Navy of the Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>
e-mail: olpozdnjakova@gmail.com

Дерепа Анатолій Войткович

доктор технічних наук
старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-дослідного управління розвитку морських озброєнь та техніки Військово-Морських Сил Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7334-2237>
e-mail: derepaan@i.ua

Derepa Anatolii

Doctor of Technical Sciences
Senior Research
Leading Researcher of the Department of Armament and Military Equipment of Navy of the Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7334-2237>
e-mail: derepaan@i.ua

Ластівка Іван Олексійович

доктор технічних наук
професор
завідувач кафедри вищої математики Національного авіаційного університету
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5226-9819>
e-mail: iolastivka@gmail.com

Lastivka Ivan

Doctor of Technical Sciences
Professor
Head of Department of Higher Mathematics National Aviation University
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5226-9819>
e-mail: iolastivka@gmail.com

Лейко Андрій Олександрович

кандидат фізико-математичних наук
науковий співробітник Державного підприємства «Київський науково-дослідний інститут гідроапаратури»
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9363-9270>
e-mail: andrii.leiko@gmail.com

Leiko Andrii

Candidate of Physics-Mathematical Sciences
Research Associate of State enterprise «Kyiv Scientific Research Institute of Hydrodevices»
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9363-9270>
e-mail: andrii.leiko@gmail.com

Дрозденко Олександр Іванович

кандидат технічних наук
доцент
доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6647-1428>
e-mail: drozdenko@i.ua

Drozdenko Oleksandr

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Senior Lecturer of the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6647-1428>
e-mail: drozdenko@i.ua

Осадча Анастасія Костянтинівна

бакалавр кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9548-1921> e-mail: aple.nastia@gmail.com

Osadcha Anastasiia

Bachelor of the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9548-1921>

Стаття надійшла до редколегії 11.01.2021.