



ОДИН З МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ СТАЦІОНАРНОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОПРУЖНОСТІ ДЛЯ РЕЖИМУ ПРИЙОМУ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ, ЩО УТВОРЕНІ СИСТЕМАМИ СТЕРЖНЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

О. В. КОРЖИК, С. А. НАЙДА, д-ра техн. наук (Нац. техн. ун-т України «КПІ»),
В. І. ДЕНИСЕНКО, канд. фіз.-мат. наук (Київ. нац. торг.-економ. ун-т)

Отримано розв'язок задачі стаціонарної гідроелектропружності для режиму прийому звукових хвиль антенними решітками на основі п'єзокерамічних стержнів з повністю електродованими торцевими гранями з використанням основних положень прикладної теорії електропружності, адекватної гіпотезам Кірхгофа–Лява, а також основних рівнянь акустики, які довшзначено умовами спряження на робочих активних поверхнях.

A solution of the problem of stationary hydroelectroelasticity was obtained for the mode of sound wave reception by arrays based on piezoceramic rods with completely electroded end faces, using the main postulates of applied theory of electroelasticity adequate to Kirchhoff-Law hypotheses, as well as the main acoustic equations, which are further defined by the conditions of mating on working active surfaces

Однією з найважливіших проблем сучасної гідроакустики є проблема комплексного підходу до проектування антенних засобів, який має враховувати особливості взаємодії основних фізичних полів під час взаємного перетворення акустичної та електричної енергії. Такий комплексний підхід передбачає постановку і розв'язок задач класу гідроелектропружності для режимів прийому та випромінювання звукових хвиль системами електропружних перетворювачів, активні елементи яких представлені в основному коливальними системами сферичного, циліндричного, пластинчатого або стержньового типу.

Сучасний стан розвитку вказаного класу задач визначається достатньо великою кількістю робіт, які стосуються в основному таких моделей представлення перетворювачів, як оболонки та пластинки. Наприклад, роботи [1–3], які присвячено розв'язку задач прийому та випромінювання звуку в стаціонарній та нестаціонарній постановці для тонких дисків, сферичних та колових циліндричних тонкостінних п'єзокерамічних оболонок відповідно.

Одним з найбільш поширених типів перетворювачів, що працюють у складі гідроакустичних антен, є стержньові [4, 5]. Вказаний перетворювач має коливальну систему у вигляді механічного стержня та традиційно використовує нижні форми коливальних [4, 6]. При цьому саме стержньовим перетворювачам приділено найменше уваги в рамках наскрізної постановки. Для них відсутній загальний аналітичний розв'язок щодо ситуацій

прийому та випромінювання звуку за узагальнених умов спряження та не розглянуто питання акустичної взаємодії елементів антени між собою. Зазначимо, що лише в роботах [7, 8] запропоновано загальні розв'язки елементарних задач електропружності для прямокутних п'єзокерамічних брусків без врахування впливу акустичного поля та досліджено особливості деяких видів електродування їх поверхонь.

В зв'язку з цим актуальним та доцільним є розгляд в наскрізній постановці роботу прийомної решітки стержньових перетворювачів як сукупності коливальних систем, що працюють в рідині в умовах зв'язаності коливальних. Вважаємо, що вказаному підходу притаманне врахування взаємозв'язків та взаємовпливу всіх полів, що беруть участь в процесі перетворення акустичної та електричної енергії.

Постановка задачі. Метою роботи є отримання аналітичного розв'язку задачі стаціонарної гідроелектропружності для оберненої акустичної антенної решітки, що складена з стержньових перетворювачів і працює в режимі прийому за традиційних умов використання фронтальних граней перетворювача та видів електродування.

Вважаємо, що призматичний стержень у вигляді прямокутного п'єзокерамічного бруска фіксованої довжини l з осью поляризації підключено до прийомного електричного тракту. Відомо [6,9], що задача описання напружено-деформованого стану вказаного електропружного елемента з врахуванням особливостей зовнішнього навантаження та його геометрії в загальному випадку достатньо складна навіть за відсутності зовнішніх механічних напруг на бічних поверхнях



стержня. Припущення та спрощення, які відповідають точним розв'язкам і є адекватними гіпотезам Кірхгофа–Лява, в основному стосуються використання гіпотези плоских перетинів для задачі про чисте стиснення–розтягнення п'єзокерамічного елемента вказаного типу [9]. При цьому вважається, що стержень виконує поздовжні гармонічні коливання, для яких зміщення та електричний потенціал є функціями лише осьової координати [7, 9]. Стержень виконано з п'єзоматеріалу, а його торцеві грані повністю електродовані.

Застосуємо до бруска довгохвильовий підхід [7, 9] та визначимо характер руху його торців як малого за хвильовим розміром поршня, що працює в ідеальній рідині.

Таким чином, рівномірність розподілення механічного збудження в межах площин торців стержня і зроблені припущення дозволять провести розв'язання наскрізної задачі про прийом звуку стержневим перетворювачем, приводячи її електромеханічну складову до задачі про поздовжні коливання п'єзокерамічного призматичного стержня з поздовжньою поляризацією при збудженні його зовнішнім акустичним впливом. Акустичну складову задачі приведено до ситуації прийому звука малими за хвильовими розмірами тілами.

Пропонується антенна решітка у вигляді системи з N електропружних елементів. Кожний з елементів решітки є багатомодовим перетворювачем з коливальною системою стержньового типу.

Розгляду підлягають поздовжні механічні коливання призматичного стержня з поляризацією вздовж осі $O_s X_s$ (рис. 1), який збуджується акустичним полем, утвореним суперпозицією падаючих та розсіяних на елементах решітки акустичних хвиль p_Σ . В свою чергу механічні коливання стержня призводять до наведення на електричних навантаженнях електродів перетворювачів Z_s змінної різниці потенціалів $ue^{-i\omega t}$ (кlemi a і b).

Введемо ряд координатних систем (рис. 2):

– загальну прямокутну систему координат $OXYZ$, яку розміщено таким чином, що ось OX лежить в площині, що перпендикулярна площині

нам поперечного перетину стержнів, а осі OZ і OY — паралельні їм;

– локальні прямокутні системи координат $O_s X_s Y_s Z_s$ і $O_j X_j Y_j Z_j$, які орієнтовані в просторі так, що осі $O_s X_s$ і $O_j X_j$ співпадають з поздовжніми осями відповідних стержнів, а осі $O_s Y_s$, $O_s Z_s$ і $O_j Y_j$, $O_j Z_j$ належать відповідним діаметральним площинам $O_j Y_j Z_j$ елементів антени;

– загальну $OR\theta\phi$ та локальні $O_s r_s \theta_s \phi_s$ ($O_j r_j \theta_j \phi_j$) сферичні системи координат;

а також одиничний вектор \mathbf{n} , положення якого відповідає кутам α і β до площин OYX і OYZ відповідно та визначає напрямок падіння плоскої акустичної хвилі p^0 .

Положення центрів сусідніх сфер визначаються системами сферичних координат, векторами r_{js} і r_{sj} , а також сукупністю кутів θ_{sj} , ϕ_{sj} та θ_{js} , ϕ_{js} відповідно.

Під впливом зовнішнього збудження p^0 сформоване повне акустичне поле оцінюється в довільній точці M з координатами R , θ і ϕ відносно центру загальної системи координат $OXYZ$. Поле описується рівнянням Гельмгольца в сферичних координатах і має бути визначено з врахуванням дифракційного взаємовпливу всіх елементів системи з діаметрами d_s , що виникає внаслідок багаторазового розсіювання акустичних хвиль. Розв'язання задачі проводимо з використанням умов спряження для всебічного навантаження сферичних перетворювачів антенної решітки з боку акустичного поля та з використанням основних положень прикладної теорії електропружності, що є адекватними гіпотезам Кірхгофа–Лява. При цьому вважаємо, що для s -го перетворювача довжиною $l_s = d_s$ існують лише нормальні механічні напруги $\sigma_{x_s}^s$, що рівномірно розподілені по торцях $x_s = \pm l_s$ і задаються рівністю:

$$\sigma_{x_s}^s \Big|_{x_s = \pm l_s} = \sigma_0 = -p_\Sigma, \quad (1)$$

а решта напружень на всіх гранях стержня дорівнюють нулю [10].

Граничні умови по електричному полю у відповідності до роботи [7] для випадку навантаження перетворювачів на деякі довільні комплексні опори записуються як:

$$\int_{-l_s/2}^{l_s/2} \frac{\partial D_x^s}{\partial t} = -\frac{U^s}{Z_s}; \quad (2)$$

для ділянок поверхні п'єзоелемента, які не містять електродів, вважаємо що:

$$D_y^s \Big|_{y_s = \pm b_s} = 0, \quad D_z^s \Big|_{z_s = \pm h_s} = 0, \quad (3)$$

$D_y^s \Big|_{y_s = \pm b_s}, D_z^s \Big|_{z_s = \pm h_s}$ — складові вектора електричної індукції.

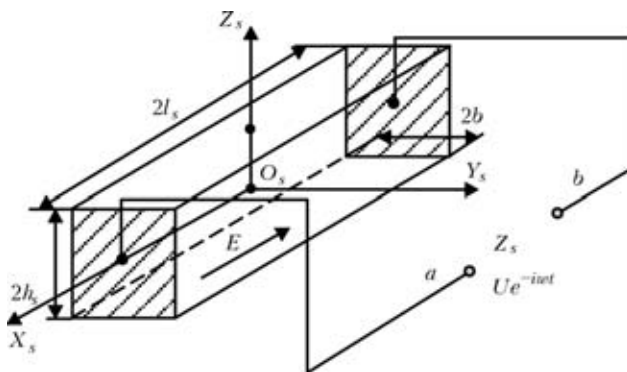


Рис. 1. Призматичний стержень з осьовою поляризацією

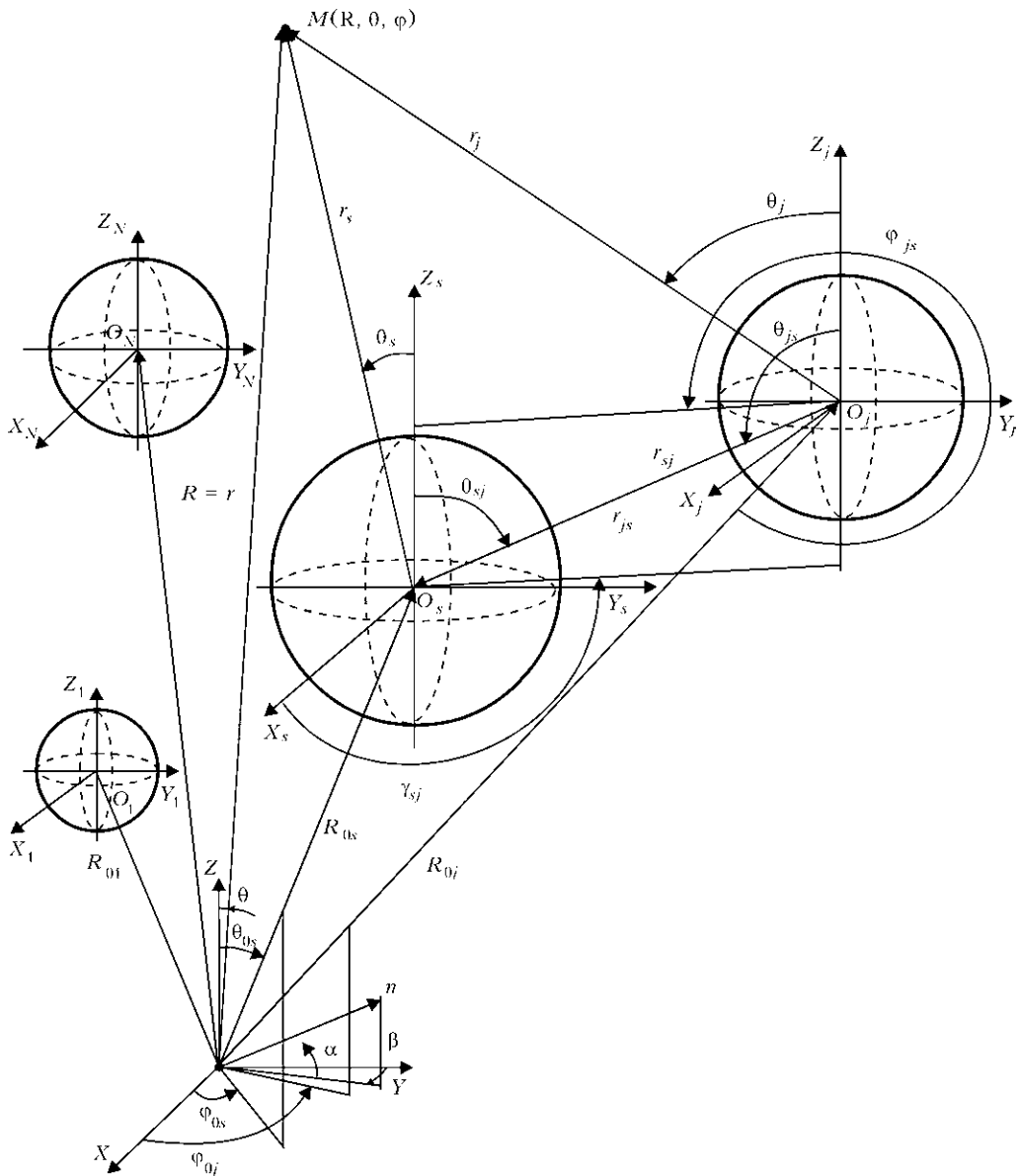


Рис. 2. Системы координат

В якості кінематичних умов обираємо умови спряження у вигляді рівності нормальних складових швидкостей часток середовища та швидкостей зміщення по нормалі точок поверхонь торців перетворювача:

$$v^s(\theta_s, \varphi_s) = v_0^s = \frac{\partial u_x^s}{\partial t} = \frac{1}{i\omega\rho} \left. \frac{\partial p_\Sigma}{\partial r_s} \right|_{r_s=l_s} \quad (4)$$

В результаті розв’язання наскрізної задачі прийому передбачається визначити знакомінні електричні напруги на навантаженнях перетворювачів Z_s по відомому тиску в полі падаючої плоскої акустичної хвилі.

Розв’язання задачі. Використовуючи вказані вище припущення, спростуємо співвідношення для п’єзоefекту [7, 10], залишаючи лише одну пару рівнянь:

$$\epsilon_x = s_{33}^E \sigma_x + d_{33} E_x, \quad D_x = \epsilon_{33}^T E_x + d_{33} \sigma_x, \quad (5)$$

де ϵ_x — компонента тензора деформацій; s_{33}^E — пружна податливість при незмінному електричному полі; d_{33} — компоненти тензора п’єзомодуля; E_x, D_x — компоненти вектора напруженості та електричної індукції; ϵ_{33}^T — діелектрична проникливість при незмінній механічній нарузі.

Доповнюючи співвідношення (5) у відповідності до роботи [7] рівняннями руху суцільного середовища

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho_{is} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad (6)$$

рівняннями вимушеної електростатики

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} = 0, \quad E_x = - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (7)$$

(Ψ — електричний потенціал) та співвідношеннями Коші для поздовжніх переміщень u_x і деформацій



$$\epsilon_x = \frac{\partial}{\partial x} U_x \quad (8)$$

отримаємо систему рівнянь, до якої застосовуються граничні умови (1)–(3). Поперечні деформації не розглядаємо.

Результуюча система рівнянь, яка записана відносно переміщень U_x та електричного потенціалу Ψ_x , має вигляд:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = \frac{1}{c_{is}^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial x^2} = \frac{1}{d_{33} (1 - k_{33}^2)} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad (9)$$

де $c_{is}^2 = 1/\rho_{is} s_{33}^E (1 - k_{33}^2)$ — швидкість поздовжніх хвиль в п'єзокерамічному стержні; $k_{33}^2 = d_{33}^2/s_{33}^E \epsilon_{33}^T$ — поздовжній статичний коефіцієнт електромеханічного зв'язку (КЕМЗ).

Розв'язки системи (9):

$$u_x = u_x(x) e^{-i\omega t} = C_n \sin(\lambda x) e^{-i\omega t}, \quad \lambda = \omega/c_{is}, \quad (10)$$

$$\Psi = \Psi(x) = [B_n x + u_x(x) k_{33}^2 / (d_{33} (1 - k_{33}^2))] e^{-i\omega t}.$$

Сталі C_n і B_n визначаються з використанням граничних умов (1)–(3).

Амплитудні значення ϵ_x , D_x , σ_x та E_x у відповідності до [7] знаходимо за формулами:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \lambda C_n \cos(\lambda x); \quad D_x = -\epsilon_{33}^T (1 - k_{33}^2) B, \\ \sigma_x &= B_n d_{33} / s_{33}^E + \epsilon_x / s_{33}^E (1 - k_{33}^2), \\ E_x &= -B_n - k_{33}^2 u_x(x) / d_{33} (1 - k_{33}^2). \end{aligned} \quad (11)$$

Враховуючи позначення повного акустичного поля як p_s , переходячи до змінної додавання та застосовуючи результати робіт [3, 10], запишемо:

$$\begin{aligned} p_M(R, \theta, \varphi) &= p_\Sigma = p^0 + \sum_{s=1}^N p_s'(r_s, \theta_s, \varphi_s), \\ r_{0s} \leq r_s < \infty, \quad 0 \leq \theta_s \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi_s \leq 2\pi. \end{aligned} \quad (12)$$

Відповідно до рис. 2 $p^0 = e^{ik(\mathbf{nR})}$, $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{0s} + \mathbf{r}_s$ розкладемо плоску хвилю за сферичними функціями:

$$\begin{aligned} p^0 &= p_0(r_s, \theta_s, \varphi_s) = e^{ik(\mathbf{nR}_{0s})} \times \\ &\times 2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n i^n \frac{j_n(kr_s)}{N_{nm}} P_n^m(\cos \theta_s) P_n^m(\cos \alpha) e^{im(\varphi - \beta)}, \end{aligned} \quad (13)$$

де $P_n^m(\cos \theta_s)$ — приєднані функції Лежандра першого роду ступеня n та порядку m ; $J_n(kr_s)$ — сферична функція Бесселя n -го порядку.

Повне поле в координатах s -ї сфери з врахуванням виразів (12) і (13) записується у вигляді:

$$\begin{aligned} p_s(r_s, \theta_s, \varphi_s) &= e^{ik(\mathbf{nR}_{0s})} 2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n i^n \frac{j_n(kr_s)}{N_{nm}} \times \\ &\times P_n^m(\cos \theta_s) P_n^m(\cos \alpha) e^{im(\varphi - \beta)} + \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm}^s P_n^{(m)}(\cos \theta_s) h_n^{(1)}(kr_s) e^{im\varphi_s}. \end{aligned} \quad (14)$$

в цьому рівнянні A_{nm}^s — невідомі коефіцієнти; $h_n^{(1)}$ — сферична функція Ханкеля 1-го роду, для хвиль, що розходяться.

Далі, відокремлюючи сферу з номером j , вважаючи, щоб на її поверхні виконувались умови

$$v^j(\theta_j, \varphi_j) \Big|_{r_j=l_j} = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_\Sigma}{\partial r_j} \Big|_{r_j=l_j} \quad (15)$$

і застосовуючи теорему додавання для сферичних хвильових функцій

$$\begin{aligned} P_q^{(p)}(\cos \theta_s) h_q^{(1)}(kr_s) e^{ip\varphi_s} = \\ = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n Q_{nmpq}^{(1)}(r_{sj}, \theta_{sj}, \varphi_{sj}) P_n^{(m)}(\cos \theta_j) j_n^{(1)}(kr_j) e^{im\varphi_j}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{де } Q_{nmpq}^{(1)}(r_{sj}, \theta_{sj}, \varphi_{sj}) &= \frac{2i^{n-q}}{N_{nm}} \sum_{\sigma=|n-q|}^{n+q} i^\sigma b_\sigma^{qpnm} P_n^{(n-m)} \times \\ &\times (\cos \theta_{sj}) j_n^{(1)}(kr_{sj}) e^{i(p-m)\varphi_{sj}}; \quad N_{nm} = \frac{2}{2n+1} \frac{(n+m)!}{(n-m)!}, \end{aligned}$$

p, m — азимутальні числа, σ, q — змінні додавання, переходимо до повного поля тиску в точці $M(R, \theta, \varphi)$:

$$\begin{aligned} p_M(R, \theta, \varphi) &= e^{ik(\mathbf{nR}_{0s})} 2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n i^n \frac{j_n(kr_s)}{N_{nm}} \times \\ &\times P_n^m(\cos \theta_s) P_n^m(\cos \alpha) e^{im(\varphi - \beta)} + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{A}_{nm}^j P_n^{(m)} \times \\ &\times (\cos \theta_j) h_n^{(1)}(kr_j) e^{im\varphi_j} + \sum_{s=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{A}_{nm}^s P_n^{(m)} \times \\ &\times (\cos \theta_s) h_n^{(1)}(kr_s) e^{im\varphi_s} \frac{2i^{n-q}}{N_{nm}} \sum_{\sigma=|n-m|}^{n+q} i^\sigma b_\sigma^{qpnm} P_\sigma^{(p-m)} \times \\ &\times (\cos \theta_{sj}) j_\sigma^{(1)}(kr_{sj}) e^{i(p-m)\varphi_{sj}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Приводячи решітку до прямолінійної та виконуючі пов'язані з цим спрощення, одержуємо вираз:



$$\begin{aligned}
 p_M(r) &= p_\Sigma = e^{ik(nR_{0s})} \times j_0(kr_j) + \tilde{A}_0^j(kr_j) + \\
 &+ \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^N \tilde{A}_0^s j_0^{(1)}(kr_j) h_0^{(1)}(kr_{sj}) = \\
 &= e^{ikd(s-1)\cos\beta} \times j_0(kr_j) + \tilde{A}_0^j h_0^{(1)}(kr_j) + \\
 &+ \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^N \tilde{A}_0^s j_0^{(1)}(kr_j) h_0^{(1)}(kr_{sj}).
 \end{aligned} \quad (18)$$

Тоді умови спряження (4), (7) приводимо до виразу:

$$\begin{aligned}
 v^j(\theta_j, \varphi_s) \Big|_{r_j=l_j} &= \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_\Sigma}{\partial r_j} \Big|_{r_j=l_j} = \frac{1}{i\rho c} \left[e^{ikd(s-1)\cos\beta} \times \right. \\
 &\times j_0'(kl_j) + \tilde{A}_0^j h_0'^{(1)}(kl_j) h_0^{(1)}(kr_{sj}) \Big].
 \end{aligned} \quad (19)$$

Застосовуючи умови гармонійності, розв'язки (10), (11), рівняння для акустичного поля (18), граничні умови (1)–(3), а також умови спряження (19) після ряду перетворень зведемо задачу до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, які записані відносно невідомих коефіцієнтів \tilde{A}_0^j та \tilde{A}_0^s :

$$\tilde{A}_0^j + \sum_{\substack{n=1 \\ s \neq j}}^N \tilde{A}_0^s \tilde{Z}_0^{sj} = \tilde{D}^j, \quad (20)$$

де

$$\tilde{D}^j = -e^{ikd(s-1)\cos\beta} \frac{j_0(kl_j) - j_0'(kl_j)/b_0(\omega)}{h_0(kl_j) - h_0'^{(1)}(kl_j)/b_0(\omega)}, \quad (21)$$

$$\tilde{Z}_0^{sj} = \frac{j_0(kl_j) - j_0'(kl_j)/b_0(\omega)}{h_0^{(1)}(kl_j) - h_0'^{(1)}(kl_j)/b_0(\omega)} h_0^{(1)}(kl_{sj});$$

$$b_0(\omega) = b_3(\omega)/b_7(\omega), \quad b_1(\omega) = i\omega \epsilon_{33}^E 2l_s (1 - k_{33}^2);$$

$$b_3(\omega) = \omega\rho c \sin\lambda_s / (\omega\rho c \lambda \cos\lambda_s) (b_1(\omega) - 2l_s/Z_s);$$

$$\begin{aligned}
 b_2(\omega) &= [b_1(\omega) - 2l_s/Z_s] / [s_{33}^E (1 - k_{33}^2) b_1(\omega)] + \\
 &+ d_{33} 2l_s / s_{33}^E Z_s b_1(\omega).
 \end{aligned}$$

Кількість рівнянь системи (20) визначається кількістю перетворювачів решітки, а сама система розв'язується відомими чисельними методами. Отже, вважаючи амплітуду тиску в падаючій хвилі p^0 одиничною, виконуючи необхідні асимптотичні наближення, що пов'язані з малістю аргументу сферичних функцій та застосовуючи вирази для коефіцієнтів (21), за системою (20) знаходимо коефіцієнти \tilde{A}_0^j та \tilde{A}_0^s . Після цього можливо визначити величину електричної напруги $U^{s,j}$ на опорах $Z_{s,j}$ за виразом:

$$\begin{aligned}
 E_x^{s,j} &= \left[e^{ikd(s-1)\cos\beta} \times j_0(kl_j) + \tilde{A}_0^j h_0^{(1)}(kl_j) + \right. \\
 &+ \left. \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^N \tilde{A}_0^s j_0^{(1)}(kl_j) h_0^{(1)}(kr_{sj}) \right] / b_2(\omega),
 \end{aligned}$$

а також характеристики механічного і акустичного поля.

Висновки

Проведено постановку та розв'язання задачі про прийом звукових хвиль антенною решіткою стержньових електропружних перетворювачів.

При цьому запропонована можливість представлення прийомного стержньового перетворювача у вигляді прямокутного поляризованого п'єзокерамічного бруска малих хвильових розмірів, з електродами на торцевих гранях; застосовано припущення класичної теорії пружності і акустики в частині малості хвильових розмірів перетворювачів решітки при описанні характеру коливань одиночного перетворювача.

В межах зазначених підходів, припущень та гіпотез, адекватних гіпотезам Кірхгофа–Лява, для стержнів отримано аналітичний розв'язок наскрізної задачі прийому та показано, що:

– розв'язання вказаної задачі може бути зведено до розв'язання лінійної системи алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів;

– кількість рівнянь системи визначається кількістю перетворювачів решітки;

– характеристики фізичних полів перетворювачів запропонованої антенної решітки можуть бути досліджені з використанням отриманих розв'язків для акустичних, механічних та електричних полів.

В подальшому із врахуванням отриманих аналітичних співвідношень є доцільним проведення розрахунків просторово-енергетичних характеристик вказаних вище полів для типових схем побудови стержньових перетворювачів та антенних решіток на їх основі.

Решена задача стационарной гидроэлектроупругости о приеме звуковых волн антенными решетками на основе пьезокерамических стержней с полностью электродированными торцевыми гранями с использованием основных положений прикладной теории электроупругости, адекватной гипотезам Кирхгофа–Лява, а также основных уравнений акустики, доопределенных условиями сопряжения на рабочих активных поверхностях.

1. Гринченко В. Т., Карлаш В. Л., Мелешко В. В. Исследование планарных колебаний прямоугольных пьезокерамических пластин // Прикл. механика. — 1976. — 12, № 5. — С. 71–78.
2. Савин В. Г., Моргунов И. О. Преобразование акустических импульсов в электрические сферической пьезокерами-



- ческой оболочкой // Электроника и связь. — 2006. — № 6. — С. 36–42.
3. Коржик О. В., Лейко О. Г. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електропружних циліндричних перетворювачів // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 4. — С. 106–114.
 4. Подводные электроакустические преобразователи. Расчет и проектирование. Справочник / Под ред. В. В. Богородского. — Л.: Судостроение, 1983. — 248 с.
 5. Дідковський В. С., Лейко О. Г., Савін В. Г. Электроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). — Кіровоград: «Імекс-ЛТД», 2006. — 448 с.
 6. Аронов Б. С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 271 с.
 7. Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А. Механика связанных полей в элементах конструкции: В 5 т. — Киев: Наук. думка, 1989. — Т.5. Электроупругость. — 280 с.
 8. Експериментальне вивчення ефективності перетворення енергії на резонансних коливаннях п'єзокерамічного стержня з розрізними електродами при керованому електричному збудженні / В. О. Андрущенко, О. В. Борисейко, Д. С. Немченко, І. А. Улитко // Доп. акустичного симпозиуму КОНСОНАНС-2009. — Київ, Електронний ресурс// <http://www.hydromech.kiev.ua/rus/WWW-CONS/2009/cons2009-038-043.pdf>.
 9. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. — М.: Наука, 1967. — 444 с.
 10. Коржик А. В. Один из методов решения задачи стационарной гидроупругости для режима излучения звуковых волн антенными решетками, образованными системами стержневых преобразователей // Інформаційні системи, механіка та керування. — 2010. — Вып. 5. — С. 61–74.

Надійшла до редакції
15.08.2011

ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Украина, Крым, Большая Ялта,
Дом творчества ученых «Кацивели» НАНУ, 29 мая – 01 июня 2012 г.



Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Международная ассоциация «Сварка»

Тематика конференции

Математическое моделирование:

- физических явлений, определяющих эффективность и распределение тепловложений при сварочном нагреве;
- процесса переноса металла при сварке;
- образования и гидродинамики сварочной ванны при сварке плавлением сплошных и пористых материалов;
- кристаллизации сварочной ванны, химического состава зоны проплавления и образования химической неоднородности;
- кинетики микроструктурных изменений при одно- и многопроходной сварке;
- зависимости химический состав — микроструктура — механические свойства;
- кинетики деформационных процессов в температурных интервалах образования горячих трещин и условий их предупреждения;

- Рабочие языки конференции — украинский, русский, английский.
- Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и направить ее в Оргкомитет до 15 марта 2012 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.
- Требования к оформлению тезисов. Текст следует набирать на одном из рабочих языков в редакторе WORD (кельг 12, через 1,5 интервала). Объем тезисов — 1 страница.

- термдеформационных процессов при сварке давлением с учетом больших деформаций;
- транспорта водорода в сварных соединениях;
- оценки риска образования холодных (водородных) трещин;
- остаточных напряжений и деформаций при многопроходной сварке с учетом изменений микроструктуры металла;
- деградации свойств материала сварных соединений под воздействием высоких температур, химически агрессивных сред и ядерного облучения;
- процесса идентификации дефектов в сварных соединениях при неразрушающих методах испытаний.

Информационные технологии в сварке, наплавке и нанесении покрытий.

Основные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 15.03.2012 г. Рассылка второго информационного сообщения до 30.03.2012 г. Рассылка приглашений на конференцию и подтверждение участия до 20.04.2012 г. Оплата организационного взноса производится на основании счетов Оргкомитета или непосредственно во время проведения конференции.

Оргкомитет

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-74
E-mail: journal@paton.kiev.ua, romanova@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua