

УДК 534.3

До визначення граничних умов в постановках задач прийому звуку сферичним електропружним перетворювачем з розрізними електродами

О.В. Коржик, д-р техн. наук,

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
пр. Перемоги, 37, Київ - 56, 030056, Україна.

На основі електропружної моделі сферичного п'єзокерамічного перетворювача у вигляді тонкої п'єзокерамічної оболонки з розрізними електродами розглянуто та уточнено умови зовнішнього електричного навантаження в наскрізній задачі прийому звуку.

Ключові слова: *прийом звукових хвиль, сферична оболонка, п'єзокерамічний перетворювач, наскрізна задача, метод часткових областей, хвильовий пружний шар.*

Вступ

Задачі використання сферичного перетворювача як складної коливальної системи з розподіленими параметрами та прийомного вимірювального елемента, в кінцевому рахунку обов'язково вимагатимуть застосування багатоелектродного покриття його активних поверхонь. Це, насамперед, пов'язано з реалізацією властивостей багатомодовості такої коливальної системи з метою використання її просторово-енергетичних особливостей.

На сьогодні запропоновано достатньо фізично адекватні підходи щодо постановки задач стаціонарної гідроелектропружності для режиму прийому звуку електропружними системами з повністю вкритою електродами поверхнею. Вони базуються на положеннях монографій [1,2] та використані в роботах [3, 4].

Проте, бажання застосування розрізних електродів для сфери вимагає деякої деталізації та уточнення граничних умов задачі прийому звуку. На сьогодні існують достатньо повні описання умов використання розрізних електродів та визначення відповідних такому типу електродування амплітудно-частотних і фазо-частотних залежностей модової структури циліндричного прийомника в плоских представленнях перетворювача [5,6]. Тому, поширення інтересу дослідників на сферичні багатомодові системи, очевидно, є не тільки актуальним, а й призведе до збагачення системи граничних умов задач стаціонарної гідроелектропружності додатковими умовами в частині довільного використання

режиму зовнішнього електричного навантаження. Власне, в цьому і полягає мета роботи.

Постановка задачі і визначення додаткових граничних умов

Отже, розглядається задача про прийом звуку тонкостінним сферичним перетворювачем в наскрізній постановці, яка належить до класу задач стаціонарної гідроелектропружності.

Передбачається, що в ідеальній рідині з густиною ρ і швидкістю звуку c розташовано коливальну систему з розподіленими параметрами у вигляді поодинокого п'єзокерамічного сферичного перетворювача.

Сам перетворювач подано сферичною електропружною радіально поляризованою оболонкою довільного радіусу R_0 з товщиною стінки h_0 (рис.1), пезоматеріал якої має густину ρ_M , та швидкість звуку c_M .

Внутрішній об'єм перетворювача – вакуумовано

Відповідно до режиму прийому п'єзокерамічний сферичний елемент працює в якості генератора електричної енергії. Деформування п'єзоелемента відбувається завдяки виникненню зовнішніх механічних напружень, які утворюються завдяки збуренню п'єзоелемента зовнішнім акустичним впливом. Таким впливом вважатимемо плоску акустичну хвилю відомої амплітуди, що знаходить з безкінечності:

$$p_0(\varphi_0, \vartheta_0) = p_0^* e^{j\omega t} e^{j\eta(\varphi_0, \vartheta_0)}, \quad (1)$$

де $\eta(\varphi_0, \vartheta_0)$ - визначає деяку функціональну залежність від кутів нападіння φ_0, ϑ_0 .

Вироблена п'єзоелементом електрична енергія споживається зовнішніми споживачами, що представляються довільними лінійними пристроями (наприклад, низькочастотним або широкосмуговим підсилювачем, пристроєм зсуву фази, суматором, тощо), втрати в яких визначаються видом та величиною деякого зовнішньо-

го навантаження - опору. Контактні групи, що нанесено на поверхню п'єзокерамічної сфери, подаються у вигляді тонких ідеальних провідників, масою яких в силу малості можна нехтувати. Це і є електроди певної геометричної форми та певного (відносно координатних вісей та напрямку падіння плоскої хвилі) розташування.

Отже, вважатимемо, що на зовнішню і внутрішню поверхні суцільного однорідного за виконанням перетворювача нанесено розрізні (електрично відокремлені один від одного) електроди, кожний з яких замкнено на окреме електричне навантаження - Z_H^I, Z_H^{II} . Вказні опори в загальному випадку є комплексними $Z_H^{I,II} = R_H^{I,II} + iX_H^{I,II}$, де $R_H^{I,II}$ та $X_H^{I,II}$, відповідно, активні та реактивні складові загальних опорів Z_H^I, Z_H^{II} . При цьому невідомими є різниці потенціалів між відповідними парами електродів 1 та 2 ($\Delta \Psi_{S_e^I}^I = U_H^I(t)$, $\Delta \Psi_{S_e^{II}}^{II} = U_H^{II}(t)$) та струми про-

водимості $I_{PR}^I(t)$, $I_{PR}^{II}(t)$ в кожному колі навантаження відповідного електроду з площинами S_e^I, S_e^{II} (рис.1.). Зауважимо, що вказані струми відповідають направленому руху вільних зарядів в провідниках зовнішніх кіл та, в основному, і визначають повний струм в них.

Таким чином, струм провідимості для відповідних зовнішніх кіл навантаження електродів визначатиметься за законом Ома рівняннями:

$$I_{PR}^I(t) = \frac{U_H^I(t)}{Z_H^I}, \quad I_{PR}^{II}(t) = \frac{U_H^{II}(t)}{Z_H^{II}}. \quad (2)$$

Як відомо, (наприклад [7]), струм в діелектрику, який є пропорційним швидкості змінення електричної індукції D_m в ньому, виникає при змінні напруженості електричного поля та характеризує зміщення зарядів, що зв'язані з молекулами матеріалу (в даному випадку – молекулами пьезоматеріалу), - є струмом зміщення $I_D^{I,II}$. Отже, струм зміщення визначається поляризацією матеріалу і відповідним рухом зв'язаних зарядів. Знаючи також, що в строгому тлумачення $I_D^{I,II}$ - не є струмом, хоч і вимірюється в таких самих одиницях, що й струм провідимості..

Тож завдяки тому, що в п'єзокераміці нема струму провідимості, а в зовнішньому колі повний струм саме дорівнює йому :

- повний струм в зовнішніх колах становить $J_{\Sigma Z}^{I,II} \Rightarrow I_{PR}^{I,II}$;
- струм в п'єзокераміці становить: $J_{\Sigma CR}^{I,II} \Rightarrow I_D^{I,II}$.

Таким чином, на границі пьезоматеріалу (тобто, - на кожному електроді) струм зміщення $I_D^{I,II}$, що ототожнюється зі змінним електричним полем і зміщенням зарядів - переходить в струм провідимості $I_{PR}^{I,II}$. При цьому амплітуда і напрямок струму провідимості співпадатимуть з амплітудою і напрямком струму зміщення.

Таке уявлення дозволяє визначення значень складових вектора електричної індукції D_m окремо для кожного електроду (виходячи з його геометрії) та кола навантаження (виходячи з його опору навантаження). Отже, доцільним є використання запропонованих раніше в роботах (наприклад [2,3]), функцій включення (рис.2)

$f^I(\varphi, \vartheta), f^{II}(\varphi, \vartheta)$ у вигляді:

$$D_m(\varphi, \vartheta) = D_m^I(\varphi, \vartheta, \varphi_0, \vartheta_0) f^I(\varphi, \vartheta) + D_m^{II}(\varphi, \vartheta, \varphi_0, \vartheta_0) f^{II}(\varphi, \vartheta). \quad (3)$$

Таким чином, результуюче електричне зміщення зарядів в п'єзокераміці визначатиметься зв'язаністю зарядів в електродованій області пьезоелектричного матеріалу. При цьому наявність, кількість та геометрія електродів може відповідати умові (3) та рис. 2 а).- в).

Наведені на рис.2 б), в) функції включення $f^I(\varphi, \vartheta)$ та $f^{II}(\varphi, \vartheta)$ визначають електродування сферичного перетворювача у вигляді двох пар (зовнішній-внутрішній) напівсферичних електродів, які повністю покривають верхні і нижні поверхні сфери відносно екватору, електрично відокремлені один від одного безкінечно тонкою лінією та абсолютно однакові за розмірами та фізичними властивостями.

За визначенням електричних граничних умов для вказаного режиму прийому та випадку електричного навантаження, використовуючи [1], для зовнішнього кола будь якого електроду можна записати

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{S_e} (\mathbf{n} \cdot D_m^{S_e}) dS = - \frac{U_H^{S_e}(t)}{Z_H^{S_e}}, \quad (4),$$

де $D_m^{S_e}$ - m -компонентний вектор електричної індукції кераміки в об'ємі під електродом з площею S_e (S_e^I, S_e^{II});

$U_H^{S_e}(t)$ різниця потенціалів на навантаженні $Z_H^{S_e}$ відповідного за площею S_e електроду.

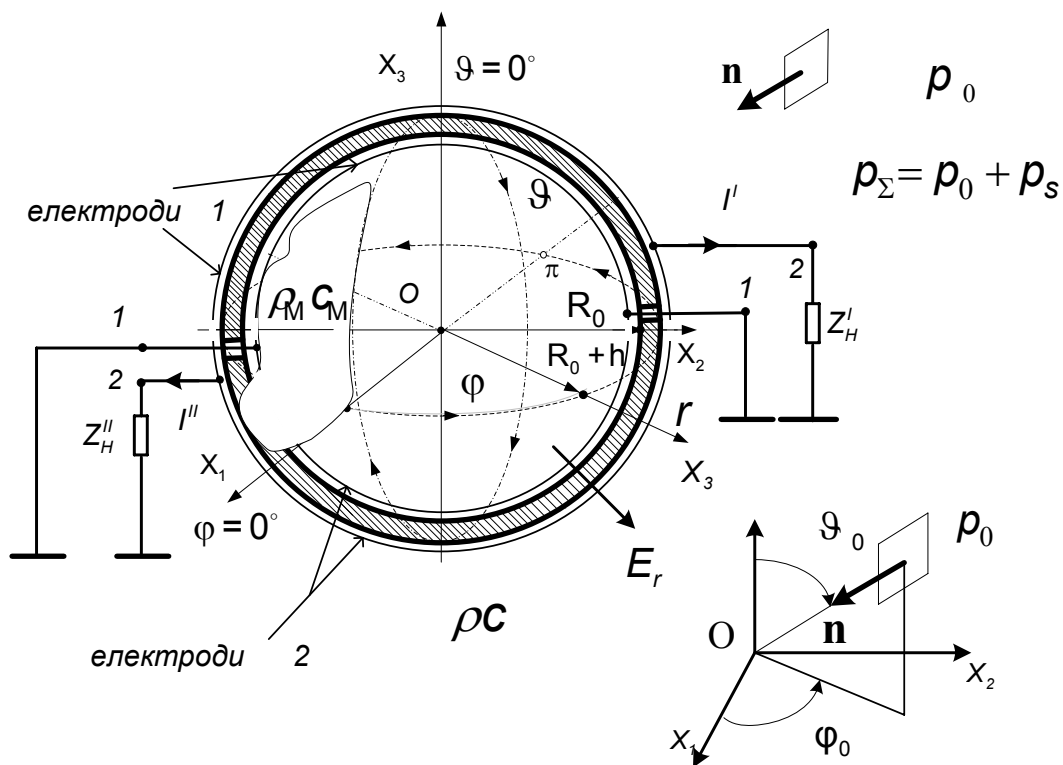


Рис. 1. Сферичний перетворювач з парою розрізних електродів

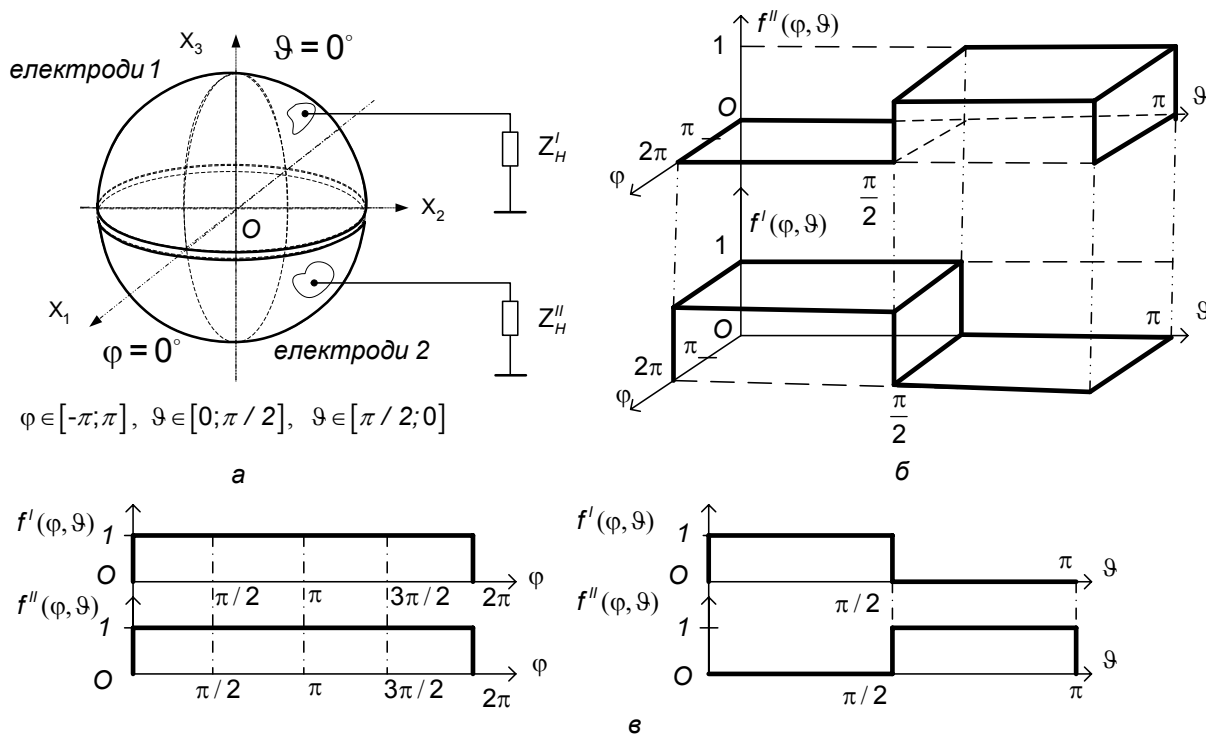


Рис. 2. Функції включення пари електродів (електроди 1, електроди 2) $f^I(\varphi, \vartheta)$, $f^{II}(\varphi, \vartheta)$

На металізованих внутрішніх і зовнішніх поверхнях перетворювача у відповідності до [2], для радіальної та кутових складових вектору зміщення D_m^{Se} ($D_r^{Se}, D_\varphi^{Se}, D_\vartheta^{Se}$) мають виконуватись рівності:

$$D_\varphi^{Se} = D_\vartheta^{Se} = 0, \quad (5)$$

$$D_r^{Se} = \mathbf{e}_{12}^* (\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\vartheta\vartheta}) + \chi_{11}^* E_r + \frac{\mathbf{e}_{12}}{C_{11}^E} (p_0 + p_s),$$

де $\mathbf{e}_{12}^* = \mathbf{e}_{12} - \mathbf{e}_{11} \frac{C_{12}^E}{C_{11}^E}$, $\mathbf{e}_{12} - \mathbf{e}_{11}$ - п'єзоконстанти;

C_{12}^E, C_{11}^E - компоненти тензору пружності;

$\varepsilon_{\varphi\varphi}, \varepsilon_{\vartheta\vartheta}$ - компоненти тензору деформацій;

$\chi_{11}^* = \chi_{11}^\varepsilon + \mathbf{e}_{11} \frac{\mathbf{e}_{12}}{C_{11}^E}$, χ_{11}^ε - компонента тензору

діелектричної проникності;

E_r - радіальна складова вектору напруженості електричного поля в п'єзокераміці.

Завдяки тонкостінності оболонки (що включає змінення її фізичного стану за товщиною) рівності щодо кутових складових D_m^{Se} ($D_\varphi^{Se}, D_\vartheta^{Se}$) поширюється на об'єми під відповідними електродами.

Поляризація деформівної п'єзокерамічної оболонки має повністю визначитися радіальною компонентою вектора D_m^{Se} (D_r^{Se}), а електричний заряд $Q_{S_e}^{I,II}$ на відповідному електроді S_e^I, S_e^{II} , який формується вільними носіями електричного струму в результаті впливу на них електричного поля поляризаційних зарядів деформівного п'єзоелектрика, запишеться як:

$$Q_{S_e}^I = - \int_{S_e^I} D_r^I dS_e^I = \quad (6)$$

$$= -(R_0 + h_0)^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} D_r^I(\varphi, \vartheta) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi,$$

$$Q_{S_e}^{II} = - \int_{S_e^{II}} D_r^{II} dS_e^{II} = \quad (7)$$

$$= -(R_0 + h_0)^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} D_r^{II}(\varphi, \vartheta) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi,$$

де D_r^I, D_r^{II} - з врахуванням (3) відповідають другому рівнянню з (5), а S_e^I, S_e^{II} - площі відповідних електродів, для яких,

$$dS_e^{I,II} = (R_0 + h_0)^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi.$$

Далі, застосовуючи рівняння (4) і (3), для струму провідимості відповідного кола означених електродів, та для різниці потенціалів на відповідному навантаженні можна записати:

$$I_{PR}^{I,II} = - \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \int_{(S_e^I, S_e^{II})} D_r^{I,II} dS_e^{I,II} \right\} \begin{Bmatrix} f^I(\varphi, \vartheta) \\ f^{II}(\varphi, \vartheta) \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

$$U_H^{I,II} = I_{PR}^{I,II}(t) \cdot Z_H^{I,II} \begin{Bmatrix} f^I(\varphi, \vartheta) \\ f^{II}(\varphi, \vartheta) \end{Bmatrix}. \quad (9)$$

Отже, в результаті виникнення певного напружено-деформівного стану оболонки, що визначатиметься (на загал) впливом (1), кутами падіння (φ_0, ϑ_0) та наявністю розсіяного поля p_s , струми провідимості (2),(4), що виникають у відповідних колах, не обов'язково мають бути однаковими за амплітудою та напрямком протікання. Це саме в частині амплітуди і знаку стосується і різниці потенціалів.

Таким чином, рівняння (8),(9) з врахуванням вищенаведених міркувань та класичних положень монографій [1,2] начебто в повній мірі визначатимуть електричний бік багатоелектродного прийомного сферичного радіально поляризованого перетворювача.

Проте, існують деякі особливості. Означимо їх, розглянувши режими короткого замкнення навантаження електроду та холостого ходу.

Режим короткого замкнення

Нехай клеми 1 та 2 (рис. 1) працюючого в режимі реального електричного навантаження перетворювача (скажімо пара вказаних контактів для електроду 2) замкнено накоротко.. Це відповідатиме також використанню функції включення $f^I(\varphi, \vartheta)$ (наведено на для рис. 2).

Відомо [1,2], що рівняння стану виду

$$D_r^{Se} = \mathbf{e}_{mij} \varepsilon_{ij} + \chi_{11}^\varepsilon E_n, \quad (10)$$

де $\mathbf{e}_{mij} \varepsilon_{ij} = D_n^{np}$ - електрична поляризація, що обумовлена пружними деформаціями сфери;

$\chi_{11}^\varepsilon E_n = D_n^{kl}$ - електрична поляризація, що обумовлена кулонівською складовою власне і означає наявність пари сил протидії зовнішньому впливу (1)

При замкненні вирівнювання зарядів на внутрішніх та зовнішніх електродах пари 2 супроводжується зменшенням різниці потенціалів, а, отже, протидіяти зовнішньому впливу буде ли-

ше складова сил пружності. При цьому зменшення напруженості електричного поля E_n^{in} відбуватиметься до значення $E_n^{in} = 0$.

Фактично, коротке замкнення призводить до миттєвого зменшення різниці потенціалів $\Delta \Psi_{S_e^I}^I$. Безперечно, це відбуватиметься за умов збереження товщини оболонки h_0 та виконання співвідношення :

$$U_n^I = - \int_{-h_0/2}^{h_0/2} E_r^I dh, \quad \forall x_j \in S_e^I.$$

Таким чином, струм зміщення визначатиметься і керуватиметься лише деформацією пьезоматеріала з відповідною поляризацією і негайною компенсацією зміщених зарядів, а зовнішнє навантаження відповідає ситуації, для якої різниця потенціалів (падіння електричної напруги) дорівнює нулю.

Значить, за збереження вказаного режиму зовнішнього навантаження і сталістю напруженості електричного поля ($E_n^{in} = 0$) протидія зовнішнім, акустичним впливам відбувається лише за рахунок сил пружності. Отже, режим ефективного навантаження визначатиме режим деформування, а використання виникаючих їх зв'язаних зарядів - визначатиме ступінь жорсткості оболонки на тих її ділянках, які знаходяться під електродами.

Зауважимо, що в рівнянні (10) залишиться лише динамічна складова - перший член $D_n^{np} = e_{mij} \varepsilon_{ij}$, використання якого після рядупретворень призводить до наступного результату:

$$D_r^{S_e} = e_{12}^* (\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\vartheta\vartheta}) + \frac{e_{12}}{c_{11}^E} (p_0 + p_s). \quad (11)$$

Як видно (вирази (10), (11)) електрична індукція для реального навантаження та короткого замикання визначатиметься по-різному. Відмінність полягає в використанні виразу для ефективної діелектричної проникності χ_{11}^* , яка в свою чергу залежить від пружності (друге рівняння групи (5)).

Режим холостого ходу

При розмиканні зовнішнього кола електродів 2 (обрив кола біля клеми 2) для нього створюється режим холостого ходу. При цьому вираз для струму провідності зовнішнього кола становить:

$$J_{\Sigma Z}^{I,II} \Rightarrow I_{PR}^{I,II} = 0 \quad (12)$$

Рівність (12) визначає ситуацію, коли сумарний заряд на електродах не змінюється при деформуванні сферичної п'єзокерамічної оболонки, а розрив кола унеможливило рівність на цій електричній границі струму зміщення і струму провідності.

При цьому вектор напруженості електричного поля не зменшується до нуля ($E_n^{in} \neq 0$). Таким чином, при нульовому струмі провідності в зовнішньому колі - між електродами пари 2 існує різниця потенціалів, за якою обчислюється електрична напруга :

$$\Delta \Psi_{S_e^{II}}^{II} = 0 - \Psi_{S_e^{II}}^{II} = U_H^{II}(t). \quad (13)$$

Для такого типу електричного навантаження характерним є збільшення жорсткості тієї частини облонки, що знаходиться під розімкнутими електродами.

Зазначимо, що загальне змінення жорсткості забезпечується також сумісно направленою (збільшення), або протилежно направленою (зменшення) дією пружних сил та сил Кулона.

Таким чином, вказаний підхід передбачає різке (ступінчасте) змінення фізичного стану (скажімо, жорсткості) п'єзокераміки на границі розділення пар електродів (пари електродів 1 та пари електродів 2). Суцільність виконання сфери, очевидно, не дозволяє подібного змінення і потребує з'ясування питання організації доменної структури в околиці кінцевих областей електродів та між ними на малій нелектродованій ділянці.

Відомо ([1]), що для неелектродованої ділянки поверхні пьезопретворювача S мають бути записані свої граничні умови виду:

$$\Delta \Psi_S = 0, \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{D}_m^S = 0, \quad (14)$$

що також залишає невизначеність щодо врахування або нехтування і розрізом між електродами з огляду на його малість.

Отже, такі особливості суттєво ускладнюють постановку граничних умов по електричному полю.

Для запобігання додатковим ускладненням пропонується виконання сферичного перетворювача з двох ідентичних за фізичним станом, поляризацією, геометрією та електродуванням напівсфер. Сфери вважатимемо ідеально склеєними по екватору (поверхня склеювання - $\vartheta = \frac{\pi}{2}$). При цьому з'являється вимога щодо рів-

ності на границі - екваторі складових переміщень точок поверхні оболонок :

$$\begin{aligned} u_r^1(\varphi, \vartheta) \Big|_{\vartheta=\pi/2} &= u_r^2(\varphi, \vartheta) \Big|_{\vartheta=\pi/2}, \\ u_\vartheta^1(\varphi, \vartheta) \Big|_{\vartheta=\pi/2} &= u_\vartheta^2(\varphi, \vartheta) \Big|_{\vartheta=\pi/2} \end{aligned} \quad (15)$$

а також рівності механічних напружень

$$\sigma_{\vartheta\vartheta}^1(\varphi, \vartheta) \Big|_{\vartheta=\pi/2} = \sigma_{\vartheta\vartheta}^2(\varphi, \vartheta) \Big|_{\vartheta=\pi/2}. \quad (16)$$

Введення цих додаткових граничних умов дозволяє врахувати ситуацію стрибкоподібного змінення жорсткості оболонки та виключити пограничні явища, що відповідають особливостям й граничних ефектів, пов'язаних з розподілення доменної структури в кінцевих областях електродів в об'ємі п'єзоелементу.

Висновки

В роботі визначено основні фізичні засади застосування електричних граничних умов в постановках задачі прийому звуку електропружними сферичними перетворювачами з розрізними електродами. Показані напрямки розвитку модельних уявлень та наведено додаткові граничні умови для застосування фізичної моделі перетворювача у вигляді складеного електропружного об'єкта.

Література

1. Гринченко В.Т., Улитко А. Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций: В 5 т. // Отв. ред. А.Н. Гузь АН

УССР. – К.: Наукова думка, 1989. – Т. 5: Электроупругость. – 280 с.

- Петрищев О.Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов Часть 1. Гармонические колебания пьезоэлектрических элементов в вакууме и метод резонанса-антирезонанса. Киев:, "АВЕРС", 2012. -299 с.
- Коржик А.В. Прием звука сферическим электроупругим преобразователем с полностью электродированной поверхностью, который размещен в замкнутом упругом слое // Электроника и связь. – 2012. – №6. – С. 55-65.
- Дидковский В.С., Климов А.Е., Лейко А.Г., Петрищев О.Н. Радиальные колебания цилиндрической пьезокерамической оболочки // Электроника и связь.-2009.-№ 6(53). –С. 31-40.
- Коржик А.В. Амплитудно-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // Акустичний вісник, 2009.-Т.12,-№ 3.- С.33-40.
- Коржик А.В. Фазо-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности.// Акустичний вісник, 2009.-Т. 13. -№ 4.- С. 29-33.
- Анго Андре. Математика для электро и радиоинженеров. – М.: Наука , 1964. – 772 с.

УДК 534.3

К определению граничных условий в постановках задач приема звука сферическим электроупругим преобразователем с разрезными электродами

А.В. Коржик, д-р техн. наук

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", пр. Победы, 37, Киев - 56, 030056, Украина.

На основе электроупругой модели сферического пьезокерамического преобразователя в виде тонкой сферической пьезокерамической оболочки с разрезными электродами рассмотрены и уточнены условия внешнего электрического нагружения в сквозной задаче о приеме звука. Библи. 7, рис. 2

Ключевые слова: гидроэлектроупругость, сферическая оболочка, гидроакустический пьезокерамический преобразователь, сквозная задача, прием и излучение звуковых волн, электродирование.

UDC 534.3

To the boundary conditions for problem of sound receiving by spherical electroelastic transducer with disconnecting electrodes

O.V. Korzhyk, Dr.Sc.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Peremogy, 37, Kyiv - 56, 030056, Ukraine.

For a base of model of electroelastic hydroacoustic transducer-receiver, which representative by thin spherical piezoelectric shell with disconnecting electrodes, - showed and discussed the physical principles of formulating the main electrical and additional mechanical boundary conditions. Reference 7, figures 2.

Keywords: *hydroelectroelastic, spherical shell, hydroacoustic piezoceramic transducer, receiving and radiation of sound waves, disconnecting electrodes.*

References

1. *Ango A.* (1964), [The mathematics for electro- and radio engineers]. Moscow: Nauka. P.772. (Rus)
2. *Grinchenko V.T., Ulitko A.F., Shulga N.A.* (1989), [The mechanics of connecting fields in construction elements]. Monograph. Kyiv.: Naukova dumka. Vol. 5: Electroelastics. P. 280. (Ukr)
3. *Didkovsky V.S., Klimov A.E., Leiko A.G., Petricshev O.N.* (2009), [Radial vibrations of cylindrical piezoceramic shell]. Electronics and communications. No. 6(53). Pp. 31-40. (Rus)
4. *Korzhyk O.V.* (2012), [The receiving of sound waves by spherical electroelastic audio transducer with full electrical surface in a close-wave multimode based system]. Electronics and communications. No.6. Pp. 55-65 (Ukr)
5. *Korzhyk O.V.* (2009), [AF characteristics same modes of acoustical cylindrical piezoelectrical receivers with limited electrodes in conditions of modes – interaction]. Acoustic bulletin, Vol.12, no 3. Pp.33-40. (Rus)
6. *Korzhyk O.V.* (2009), [FF characteristics same modes of acoustical cylindrical piezoelectrical receivers with limited electrodes in conditions of modes – interaction]. Acoustic bulletin, Vol. 13. no. 4. Pp. 29-33. (Rus)
7. *Petrishchev O.N.* (2012), [Harmonic oscillations of piezoelectric elements/ Part 1. Harmonic oscillations of piezoelectric elements in vacuum and "resonance-antiresonance" method]. Kyiv :AVERS. P. 299. (Rus)

Поступила в редакцию 22 марта 2013 г.