

Акустические приборы и системы

УДК 534.3

Дослідження акустичних характеристик циліндричного п'єзокерамічного перетворювача з розрізними електродами

А. В. Бурлаченко, О.В. Коржик, д-р техн. наук, К.М. Скирдов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

В роботі визначаються акустичні та механічні характеристики електропружного п'єзокерамічного прийомного циліндричного перетворювача для різних умов електродування в заданому діапазоні частот, а саме: розподіли амплітуд та фаз сумарних переміщень; діаграми дотичних, нормальних та сумарних переміщень; діаграми кутових розподілів амплітуд та фаз тисків; характеристики направленості перетворювача. Розглядаються декілька випадків електродування перетворювача, а саме: $1^\circ - 30^\circ$; $1^\circ - 90^\circ$; $1^\circ - 180^\circ$. Також в роботі приведені результати аналізу отриманих даних з урахуванням обраного частотного діапазону та впливу модових складових. Для розв'язку задачі використовувався метод наскрізної постановки. Бібл. 6, рис. 10.

Ключові слова: перетворювач, розрізні електроди, п'єзокераміка, механічні характеристики, акустичні характеристики, характеристики спрямованості.

Вступ

Робота базується на методі «наскрізної» постановки задач, який зараз дуже часто використовується для розв'язку споріднених задач. У чисельних працях [1, 2] розглядалися задачі про прийом та випромінювання звуку електропружними перетворювачами, зокрема, для задач колових конфігурації перетворювачів, наявності плоскої перешкоди. В основному всі праці присвячені дослідженню перетворювачів з повністю електродованою поверхнею [1,4]. Але очевидно, що розглядання перетворювача з розрізними електродами дає нам можливість збагатити структуру електричного поля.

Питання вивчення акустичних та механічних характеристик прийомного об'єкту при падінні на нього плоскої акустичної хвилі було і є одним із найважливіших у сучасній акустиці. Це пов'язано насамперед з тим, що вимоги до акустотехніки зростають, а разом з ними зростає і необхідність розглядати об'єкти, мінімально ідеалізуючи їх властивості. Ми наближаємо модельну ситуацію до реальної, коли розглядаємо перетворювач як електропружну перешкоду, а також розв'язуємо задачу з використанням «наскрізної» постановки.

В цій статті перетворювач розглядаємо як електропружний об'єкт з розрізними електродами, що мають окремі електричні навантаження в умовах збурення перетворювача плоскою акустичною хвилею. Розглянемо особливості формування акустичних полів розсіяння, кутові розподілення фаз та амплітуд сумарних переміщень точок поверхні одиночного електропружного перетворювача, а також характеристики направленості для заданих умов.

Постановка задачі

Розглядаємо одиночний, вакуумований всередині, нескінченно довгий коловий циліндричний п'єзокерамічний перетворювач радіусом r_{OS} і товщиною h_{OS} розміщено в ідеальній малостискуваній рідині із щільністю ρ_c та швидкістю звуку C_c .

Геометрія задачі, локальні декартові $O_s X_s Y_s$ і циліндричні $r_s \varphi_s$ системи координат, схематичне зображення електродів та кіл електричних навантажень з опорами Z_1, Z_2 відповідають наведеним на рис. 1.

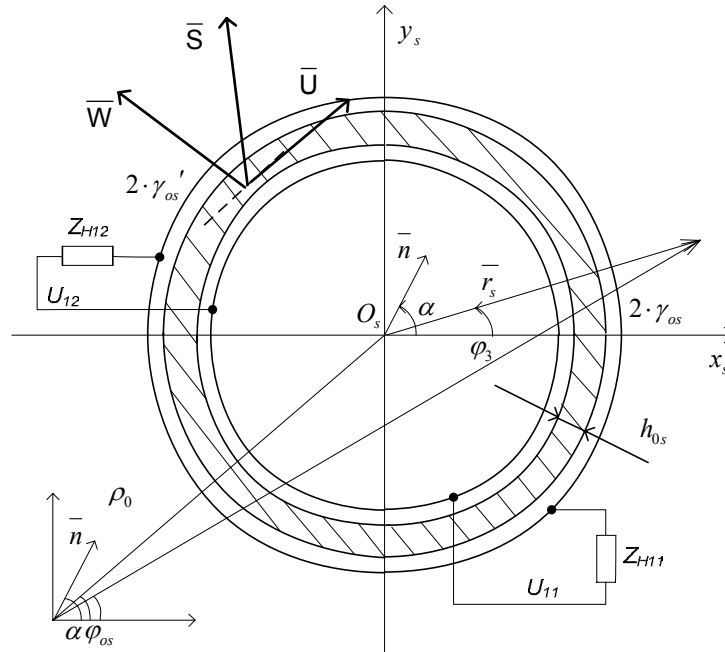


Рис. 1. Електропружний перетворювач, електричні навантаження, електродування, системи координат

На перетворювач за напрямом одиничного вектора \bar{n} під кутом α падає плоска звукова хвиля одиничної амплітуди P_0 , яка надходить із нескінченності. Умови представлення п'єзокерамічного колового циліндричного перетворювача тонкостінною електропружною оболонкою, на поверхню якої нанесено електрично розділені електроди, відповідають умовам роботи – [1-3].

Задача полягає у визначенні взаємовпливу і взаємозв'язку акустичних та механічних характеристик перетворювача – з його характеристикою направленості в умовах часткового електродування та певного електричного навантаження. А саме – побудова графіків кутових розподілів амплітуд та фаз сумарних переміщень; графіки дотичних, нормальних та сумарних переміщень для одного випадку; побудова графіків кутових розподілів амплітуд та фаз тисків; побудова характеристик направленості перетворювача, які відповідають наведеним нижче умовам розрахунків.

Приведемо всі умови проведення розрахунків:

- Діапазон частот: $\{4000 - 12000\}, \text{Гц}$;
- Число коефіцієнтів, які враховувалися в розрахунках: 11;
- Кут падіння плоскої хвилі на циліндричну оболонку: $\alpha = 0^\circ$;
- Кількість членів ряду Фур'є: 300;
- Характеристики середовища, опір та швидкість звуку відповідно: $1000, 1500 \text{ м/с}$;

- Товщина та радіус досліджуваної оболонки відповідно: $0,006; 0,0675 \text{ м}$;
- Кути розкриття електродів: $1^\circ - 30^\circ; 1^\circ - 90^\circ; 1^\circ - 180^\circ$;
- Електричне навантаження: $1000, \text{Ом}$;

Сумарне акустичне поле $P_\Sigma = P_0 + P_s'$ складається з поля падаючої хвилі P_0 та розсіяного поля P_s' . Точки поверхні оболонки здійснюють коливальні рухи з врахуванням допущень гіпотез Кірхгофа-Лява, а сумарні переміщення поверхні оболонки S_Σ є результатом двох складових – нормальної W та тангенціальної U (рис. 1) [5].

З рис. 1 видно, що сумарне переміщення поверхні оболонки S_Σ утворюється як векторна сума переміщень поверхні у радіальному та дотичному напрямках. Модуль сумарного переміщення обчислюється як гіпотенуза прямокутного трикутника, катетами якого є вектори нормальної та тангенціальної складових, вираз для обчислення (1):

$$|S_\Sigma| = \sqrt{|W|^2 + |U|^2} \quad (1)$$

Напрямок вектора сумарних переміщень визначається з того ж прямокутного трикутника за теоремою про те, що тангенс прилеглого кута рівний відношенню протилежного до прилеглого катетів, звідси можемо записати наступну формулу для фази сумарного переміщення (2):

$$\psi = \arctan\left(\frac{|U|}{|W|}\right) \quad (2)$$

З врахуванням геометрії задачі, напрямку нормалі \bar{n} для знаходження сумарних переміщень $S_{\Sigma}(\varphi_s)$ використаємо результати розрахунків $|W|, |U|$ за відомими [3] співвідношеннями (3):

$$B_n = \frac{in[1 + \beta^2 \xi_p n^2]}{\Omega^2 - n^2(1 + \beta^2 \xi_p)} \quad (3)$$

де Ω^2 – безрозмірний частотний параметр;

$$\beta^2 = \frac{h_s^2}{12r_{os}}; \xi_p = \frac{1 + K_p^2(1 + \nu)}{2(1 - K_p^2)}$$

K_p^2 – планарний коефіцієнт електромеханічного зв'язку; ν – коефіцієнт Пуассона; h_s – товщина п'єзокерамічної оболонки; r_{os} – радіус середньої лінії циліндричної оболонки.

Варто відзначити, що всі вище згадані величини є функціями кутової координати φ_s та залежать від кута α .

Аналіз результатів

Плоска хвиля падає на поверхню оболонки і діє на неї з деякою силою, за рахунок якої виникають деформації поверхні оболонки. Оболонка

частково електродована, тому при деформації електродованої її частини вступає в силу прямий п'єзо ефект. Вважатимемо, що електродовані та неелектродовані ділянки оболонки визначають струми провідимості в колах електричних навантажень перетворювача (тобто електродів оболонки). Ми можемо впливати на величини струмів, що виникають, так як вони визначаються характером зв'язаності форм коливань для даної частоти, видом, величиною опорів електричних навантажень та видом електродування поверхні перетворювача-оболонки [6].

На рис. 2 приведені графіки для нормальних W , тангенціальних U та, як результат, сумарних S переміщень точок поверхні оболонки для падаючої хвилі з частотою 8200 Гц та електричного навантаження 1000 Ом. З рис. 2 видно, що нормальна складова переміщень є домінуючою, вона задає форму сумарному переміщенню поверхні оболонки, в той час як дотичні компоненти лише задають зміщення в напрямках 90° та 270° . Також, із рисунку видно, що переміщення поверхні більш виражене в зоні акустичного освітлення (яка відповідає куту 180°), частина оболонки в зоні тіні зміщується набагато менше, особливо яскраво це виражено на графіку для тангенціальних переміщень (рис.2, б).

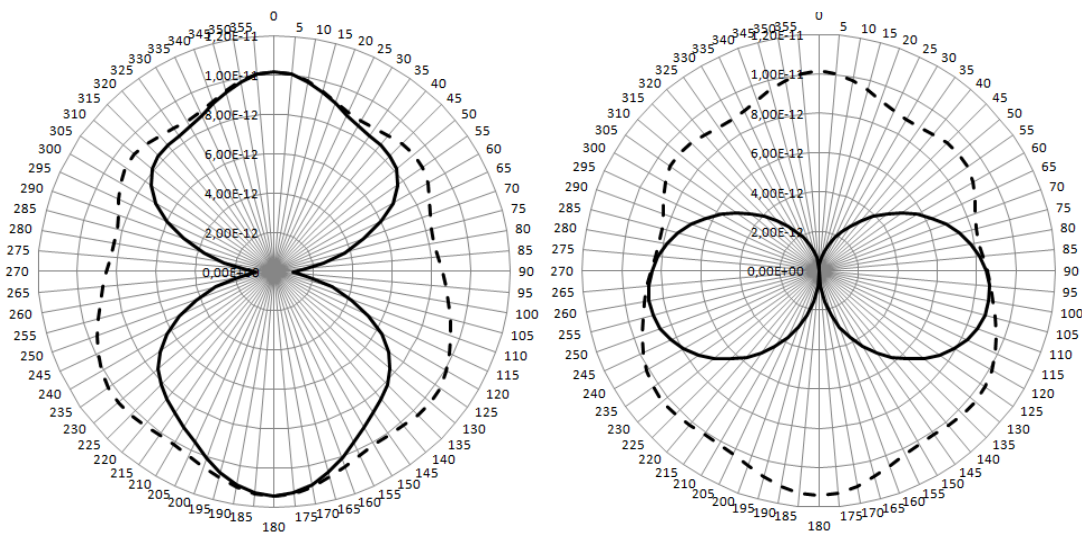


Рис. 2. Кутове розподілення амплітуд нормального W та повного S (а), тангенціального U та повного S (б) переміщень оболонки при симетричному електричному навантаженні $Z_1 = Z_2 = 1000, \text{ Ом}$ та частоті падаючої хвилі 8200, Гц

На рисунку 3 суцільною лінією позначені графіки розподілу амплітуд переміщень точок поверхні оболонки, а штриховою – графіки оболонки в стані спокою, так званій «нульовий рівень».

Плоска хвиля падає на циліндричну оболонку-перетворювач в напрямку 180° . Зразу відмітимо симетричність переміщень точок поверхні відносно напрямку падіння плоскої хвилі. На графіках рис. 3 видно, що саме в цьому напрямі амплітуди переміщень точок поверхні максимальні, що є характерним для звукоосвітленої зони: для частоти $8200, \text{Гц}$ відхилення від «нульової» позиції складає $3, \text{дБ}$; для частоти $4200, \text{Гц}$ – $1, \text{дБ}$; для частоти $10000, \text{Гц}$ – $1,54, \text{дБ}$; для частоти $11500, \text{Гц}$ – $1-2, \text{дБ}$. Мінімальні відхилення точок поверхні від положення рівноваги характерні для напрямів області звукової тіні: у першому випадку, для частоти $4100, \text{Гц}$ – $0^\circ - 40^\circ$ та $320^\circ - 360^\circ$; у другому випадку, для частоти $8200, \text{Гц}$ – $80^\circ - 280^\circ$, у третьому випадку, для частоти $10000, \text{Гц}$ – 290° та 70° ; для останнього випадку, частоти $11500, \text{Гц}$ – 33° та 333° . Проаналізувавши графіки на рис. 3, можна зауважити, що в коливання вносять вклад в основному нульова та перша моди, причому домінує осцилюючий характер коливань.

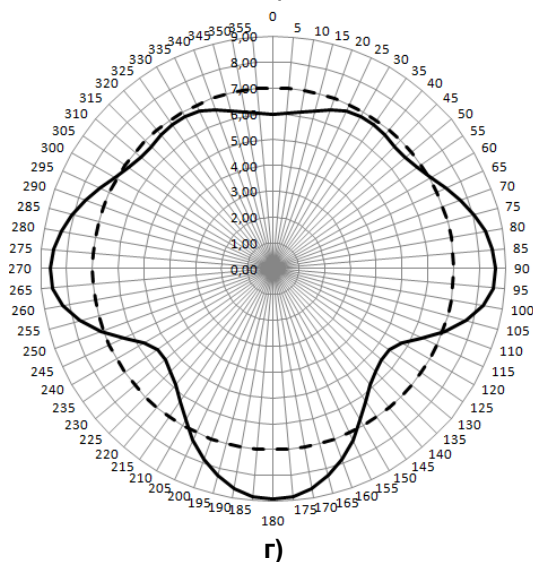
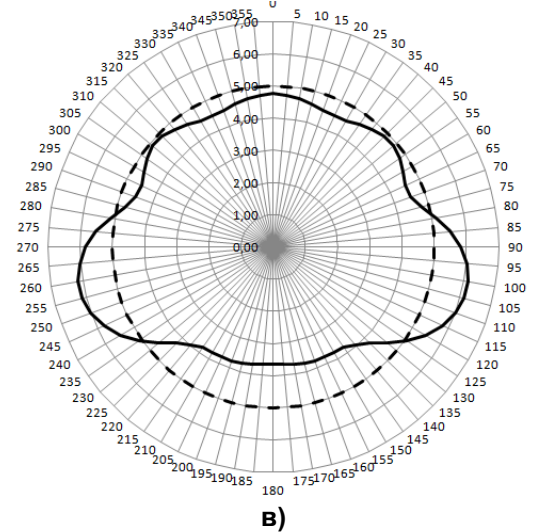
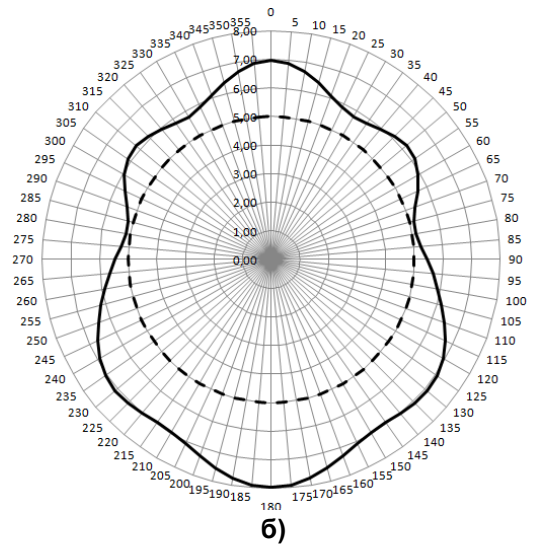
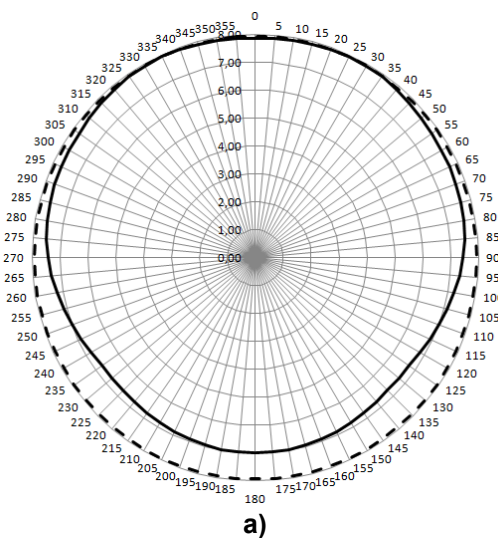


Рис. 3. Кутове розподілення амплітуд сумарних переміщень точок поверхні циліндричної оболонки при симетричному електричному навантаженні $Z_1 = Z_2 = 1000, \text{Ом}$ та частоті падаючої хвилі: а) $4100, \text{Гц}$; б) $8200, \text{Гц}$; в) $10000, \text{Гц}$; г) $11500, \text{Гц}$

Розглянемо графіки кутових розподілень фаз переміщень точок поверхні оболонки-перетворювача. Відразу викликає увагу той факт, що кутові області оболонки, $[0^\circ - 180^\circ]$ та $[180^\circ - 360^\circ]$ коливаються в протифазі, рис. 4, а-г. Ми приводимо відносний фазовий розподіл переміщень точок оболонки. При цьому приймаємо за нульовий напрям $[0^\circ - 180^\circ]$.

Отже, фаза переміщень точок оболонки на 0° та 180° рівна нулю, при цьому напрями переміщень точок поверхні співпадають – за рахунок цього оболонка набуває осцилюючого характеру руху. Точки поверхні на 90° та 270° рухаються в протилежних напрямках, таким чином спричиняючи додаткові коливання поверхні оболонки, окрім основних осцилюючих. Ці додаткові коливання зумовлені пружністю оболонки.

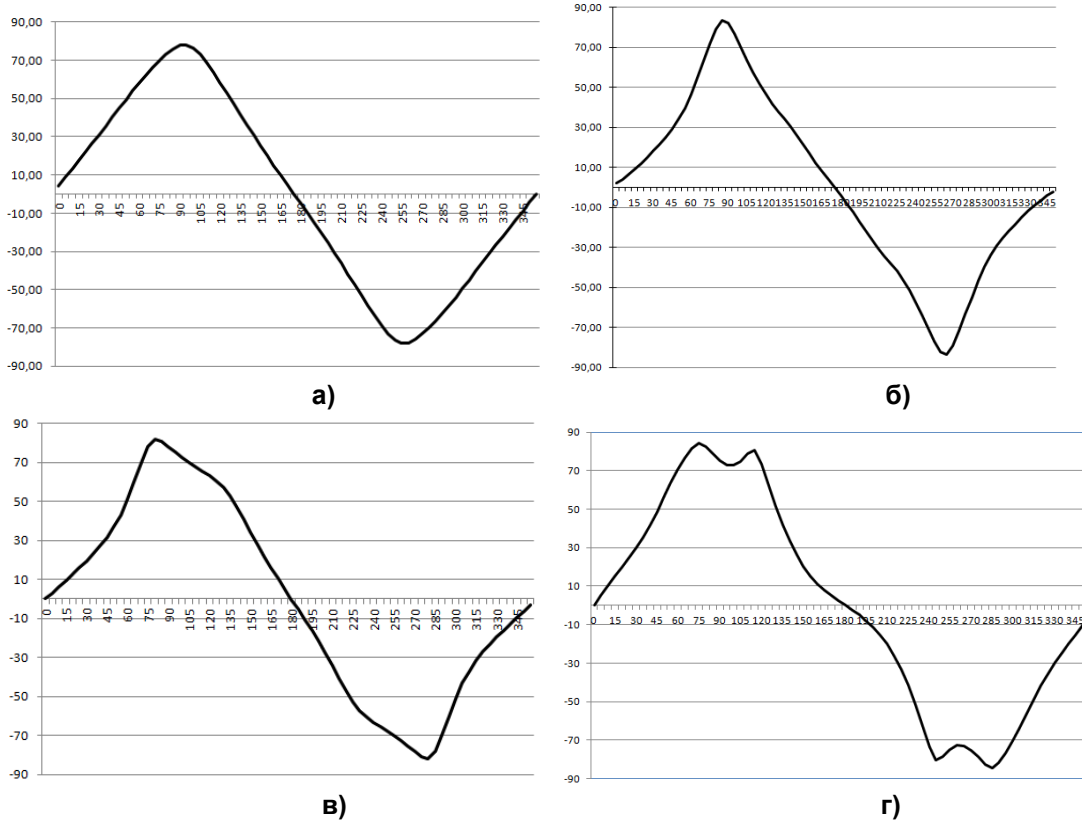


Рис. 4. Кутове розподілення фаз сумарних переміщень точок поверхні циліндричної оболонки при симетричному електричному навантаженні $Z_1 = Z_2 = 1000, \text{ Ом}$ та частоті падаючої хвилі: а) 4100, Гц ; б) 8200, Гц ; в) 10000, Гц ; г) 11500, Гц

На рис. 5 приведені кутові розподілення амплітуд тиску у дальньому полі. Відмітимо, що на обох розглянутих частотах розподілення носить симетричний відносно напрямку падаючої хвилі характер. Це зумовлено тим, що ми розглядаємо випадок симетричного навантаження електродів електропружної оболонки. Проте характер розподілу амплітуд міняється зі

зміною частоти. Для частоти падаючої хвилі 8200, Гц розподіл амплітуд містить дві пелюстки на частоті 10000, Гц видно, що одна з пелюсток розділяється на дві, а для частоти 11500, Гц на графіку вже з'являються чотири пелюстки. Ця ситуація повністю підтверджується і кутовими розподіленнями фаз на даних частотах падаючої хвилі (рис. 5).

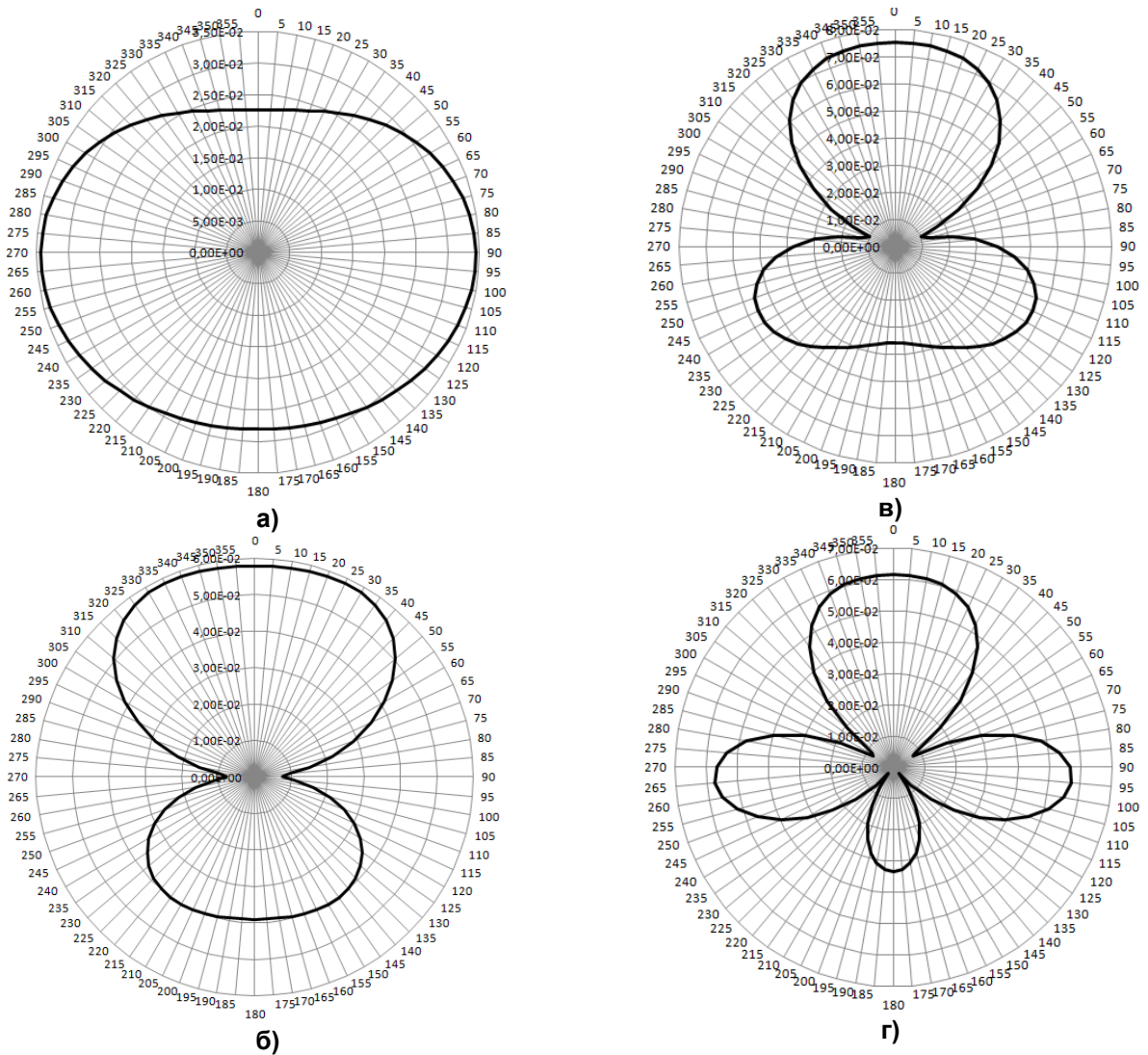


Рис. 5. Кутове розподілення амплітуд тиску у дальньому полі, P_D для випадку симетричного електричного навантаження електродів оболонки $Z_1 = Z_2 = 1000, \text{Ом}$ та частоті падаючої хвилі: а) 4100, Гц ; б) 8200, Гц ; в) 10000, Гц ; г) 11500, Гц

З графіків на рис. 6 видно, що при зміні частоти міняється і характер кутового розподілу тисків. Для частоти падаючої хвилі 8200 Гц фази тиску кардинально змінюються в двох областях – $[90^\circ - 270^\circ]$ та $[270^\circ - 90^\circ]$. За частоти падаючої хвилі 11500, Гц, для кутових розподілень тисків можемо виділити чотири характерні області з межовими точками – $65^\circ, 150^\circ, 225^\circ$ та 300° . Причому відмітимо, що

для областей, в яких тиск від'ємний, що фізично можемо трактувати як «розрідження» звукового поля, переміщення поверхні оболонки максимальне. Наприклад, для графіків з частотою падаючої хвилі 8200, Гц, на куті 180° спостерігаємо максимальне переміщення оболонки (див. рис. 2.а) і при цьому даному куту відповідає від'ємна область звукових тисків (див. рис. 4.а).

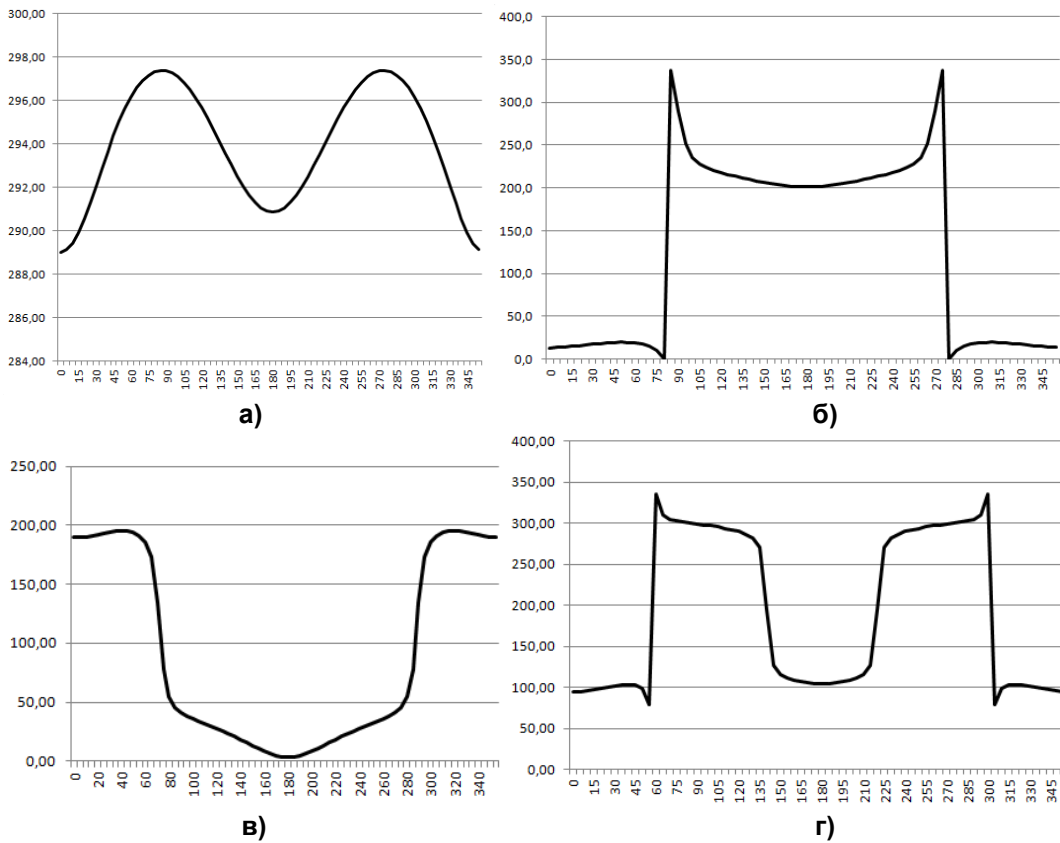


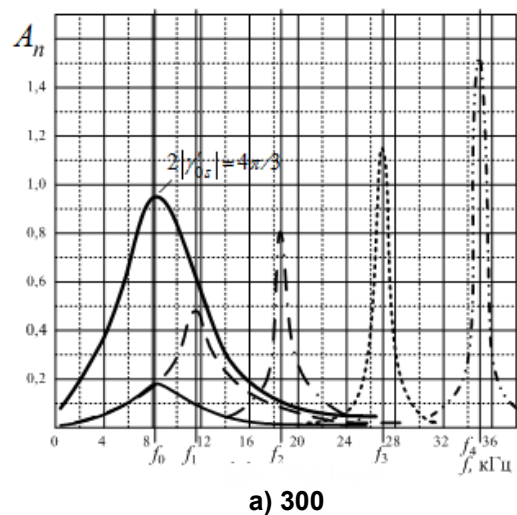
Рис. 6. Кутове розподілення фаз тиску у дальньому полі, P_D для випадку симетричного електричного навантаження електродів оболонки $Z_1 = Z_2 = 1000, \text{ Ом}$ та частоті падаючої хвилі: а) 4100, Гц; б) 8200, Гц; в) 10000, Гц; г) 11500, Гц

Відзначимо також, що для фазових розподілів переміщень та тиску для обох розглянутих випадків характерна симетричність. Але варто наголосити, що існує властивість втрати симетрії, яка найяскравіше проявляється для області частот, близьких до резонансної. В дальніх від резонансу областях система відтворює втрачену на резонансному ряді жорсткість, і симетрія відносно кута падіння знов з'являється.

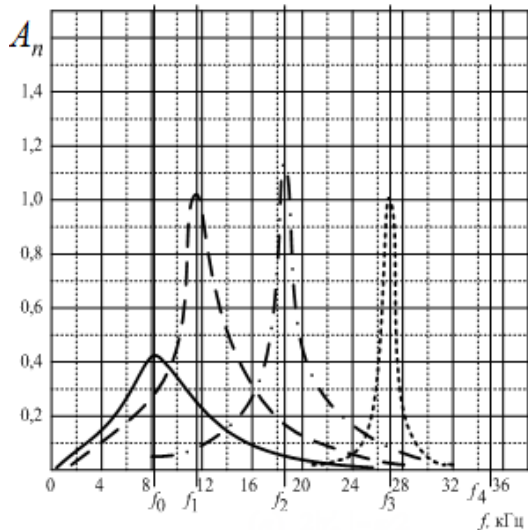
Тепер приведемо для визначених вище умов графіки характеристик направленості в залежності від частоти падаючої хвилі. Відомо, що амплітудно-частотна характеристика для нульової моди коливань характеризує її як найбільш енергонасичену [7], коли ми розглядаємо повністю електродований перетворювач. При цьому максимальне значення АЧХ отримуємо на резонансі нульової моди. Якщо розглядаємо перетворювач із неповністю електродованою поверхнею, то результуючий сигнал буде керуватися сукупністю мод. Наприклад, якщо розглядаємо симетричний випадок електродування, то електричний сигнал на нарузці електродів буде визначатися сукупністю мод: нульовими і непарними. Але ми розглядатимемо

випадок несиметричного неповного електродування перетворювача [1].

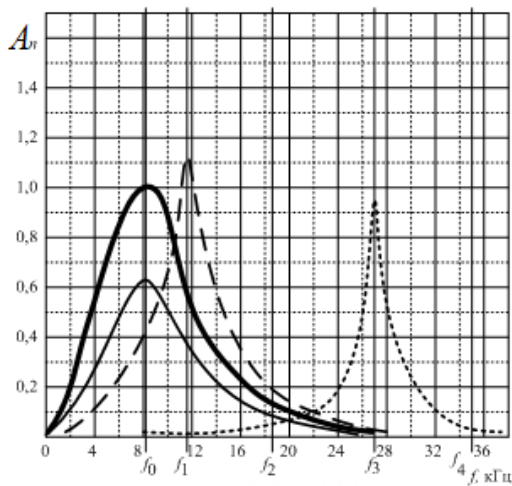
На рис. 7 зображені графіки амплітудно-частотних характеристик для електроакустичного перетворювача з розрізними несиметричними електродами. Кути нанесення електродування становлять 1° та 30° . Результати отримані для частот – 4,1; 8,2; 11,5 кГц.



а) 300



б) 900



в) 900

— мода, $n=0$; - - мода, $n=1$; - · - мода, $n=2$;
 мода, $n=3$; - · · · мода, $n=4$;

Рис. 7. АЧХ для кута розкриття електродів – 300; 900; 1800

Розглянемо графік нарисований суцільною лінією на рис. 8 – тобто характеристику спрямованості для частоти 4100, Гц. Бачимо, що графік є симетричним відносно центральної точки – 180° . В цій точці характеристика набуває свого мінімального значення – 0,75. В двох крайніх точках – 0° та 359° – характеристика набуває свого максимального значення, тобто 1. Як було згадано вище, ми будемо характеризувати спрямованість для частоти 4100, Гц, якщо подивимося на рис. 5, то побачимо, що вибрана частота є дуже неефективною, тому що ми враховуємо лише нульову та першу моди – та й то їх бокові частини, де

рівень прямує до мінімуму. З цієї ж причини розмах значень характеристики, яку ми отримали є дуже малим, і в основному він зумовлений дифракцією звуку [2].

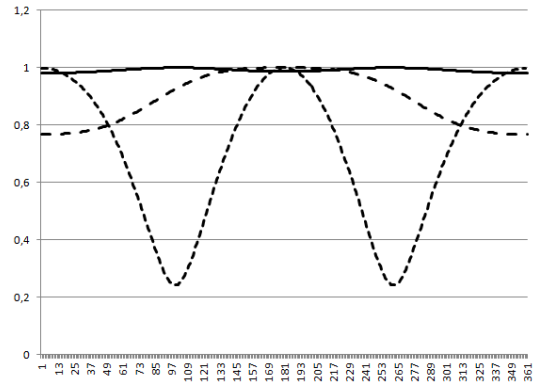


Рис. 8. Характеристика спрямованості перетворювача з частково електродованою поверхнею для кутів розкриття електродів $1^\circ - 30^\circ$ та частоти падаючої плоскої хвилі 4100, Гц (суцільна), 8200, Гц (штрихова), та 11500, Гц (пунктирна)

На рис. 8 штриховою лінією приведено графік характеристики направленості перетворювача з електродуванням: $1^\circ - 30^\circ$, частота падаючої на оболонку хвилі – 8200, Гц. Характер кривої міняється порівняно з попереднім графіком, проте амплітуда відхилень залишається дуже малою, що також пояснюється тим, що на цій частоті невеликий вклад вносять перша та друга моди (див. рис. 5). Максимум спостерігаємо в області світлової зони – 180° – що є цілком очевидним, адже в цьому напрямі падає плоска хвиля. Мінімуми спостерігаємо в тінювій зоні, яка відповідає 0° .

На рис. 8 пунктирною лінією приведено графік характеристики направленості перетворювача з електродуванням: $1^\circ - 30^\circ$, частота падаючої на оболонку хвилі – 11500, Гц. Характер кривої змінився більш суттєво, ніж у двох попередніх випадках. Амплітуда відхилень стала набагато більшою, це зумовлено тим, що на даній частоті домінують нульова та перша моди згідно рис. 5. Мінімальних значень характеристика направленості набуває на кутах 95° та 265° , яка дорівнює 0,22. Максимальних значень характеристика направленості набуває на кутах 0° та 180° , яка дорівнює 1, і ця область відповідає зоні освітленості.

На рис. 9 зображені графіки характеристики спрямованості для електроакустичного перетворювача з розрізними несиметричними елек-

тродами. Кути нанесення електродування становлять $1^\circ - 90^\circ$. Результати отримані для частот – 4,1;8,2;11,5 кГц.

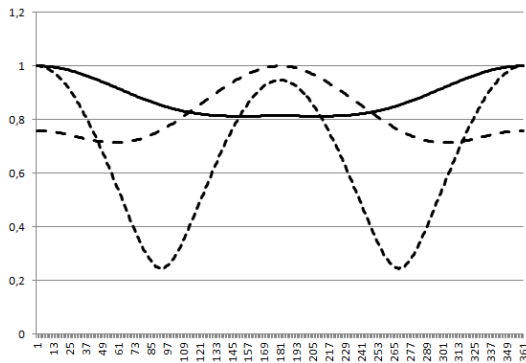


Рис. 9. Характеристика спрямованості перетворювача з частково електродованою поверхнею для кутів розкриття електродів 1° та 90° , та частоти падаючої плоскої хвилі 4100, Гц (суцільна), 8200, Гц (штрихова), та 11500, Гц (пунктирна лінія)

Розглянемо графік нарисований суцільною лінією на рис. 9 – тобто характеристику спрямованості для частоти 4100, Гц. Бачимо, що графік є симетричним відносно центральної точки – 180° . В цій точці характеристика набуває свого мінімального значення – 0,81. В двох крайніх точках – 0° та 359° – характеристика набуває свого максимального значення, тобто 1. Як було згадано вище, ми будемо характеристику спрямованості для частоти 4100, Гц, якщо подивимося на рис. 5, то побачимо, що вибрана частота є дуже неефективною, тому що ми враховуємо лише нульову та першу моди – та й то їх бокові частини, де рівень прямує до мінімуму. З цієї ж причини розмах значень характеристики, яку ми отримали є дуже малим, і в основному він зумовлений дифракцією звуку, як і в попередньо розглянутому випадку.

На рис. 9 штриховою лінією приведено графік характеристики спрямованості перетворювача з електродуванням: $1^\circ - 90^\circ$, частота падаючої на оболонку хвилі – 8200, Гц. Характер кривої міняється порівняно з попереднім графіком, проте амплітуда відхилень залишається дуже малою, що також пояснюється тим, що на цій частоті невеликий вклад вносять перша та друга моди (див. рис. 5). Максимум спостерігаємо в області світлової зони – 180° – що є цілком очевидним, адже в

цьому напрямі падає плоска хвиля. Мінімуми спостерігаємо в тінювій зоні, яка відповідає 50° та 310° .

На рис. 9 пунктирною лінією приведено графік характеристики спрямованості перетворювача з електродуванням: $1^\circ - 90^\circ$, частота падаючої на оболонку хвилі – 11500, Гц. Характер кривої змінився більш суттєво, ніж у двох попередніх випадках. Розмах графіку характеристики спрямованості став набагато більшим, це зумовлено тим, що на даній частоті домінують нульова та перша моди згідно рис. 5. Мінімальних значень характеристика спрямованості набуває на кутах 93° та 267° , яка дорівнює 0,23. Максимальних значень характеристика спрямованості набуває на кутах $0^\circ, 180^\circ$, яка дорівнює 1, і ця область відповідає зоні освітленості.

На рис. 10 зображені графіки характеристики спрямованості для електроакустичного перетворювача з розрізними несиметричними електродами. Кути нанесення електродування становлять $1^\circ - 180^\circ$. Результати отримані для частот – 4,1;8,2;11,5 кГц.

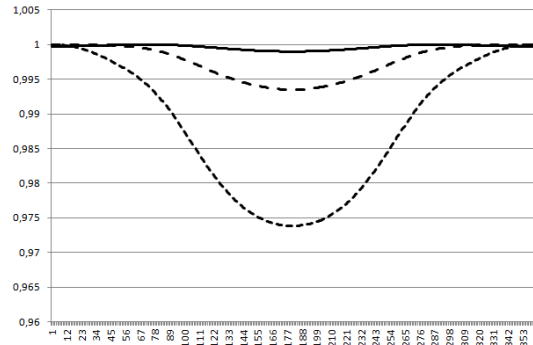


Рис. 10. Характеристика спрямованості перетворювача з частково електродованою поверхнею для кутів розкриття електродів $1^\circ - 180^\circ$ та частоти падаючої плоскої хвилі 4100, Гц (суцільна), 8200, Гц (штрихова), та 11500, Гц (пунктирна лінія)

Розглянемо графік нарисований суцільною лінією на рис. 10 – тобто характеристику спрямованості для частоти 4100, Гц. Бачимо, що графік є симетричним відносно центральної точки – 180° . В цій точці характеристика набуває свого мінімального значення – 0,999. В двох крайніх точках – 0° та 359° – характеристика набуває свого максимального значення, тобто 1. Як було згадано вище, ми будемо ха-

рактистику спрямованості для частоти $4100, Гц$, якщо подивимося на рис. 5, то побачимо, що вибрана частота є дуже неефективною, тому що на ній працюють нульова, перша та друга моди, резонанс жодної з мод не співпадає із даною частотою. З цієї ж причини розмах значень характеристики, яку ми отримали є дуже малим, і в основному він зумовлений дифракцією звуку, як і в попередньо розглянутому випадку.

На рис. 10 штриховою лінією приведено графік характеристики направленості перетворювача з електродуванням: $1^\circ - 180^\circ$, частота падаючої на оболонку хвилі – $8200, Гц$. Характер кривої не змінився порівняно з попереднім графіком, проте амплітуда відхилень стала меншою, що пояснюється тим, що на даній частоті ми потрапляємо в резонансну область першої та нульової моди (див. рис. 5). Мінімум спостерігаємо в області 180° , характеристика в цій точці рівна $0,994$. Максимуми спостерігаємо в точках 0° та 360° , в яких значення рівне 1.

На рис. 10 пунктирною лінією приведено графік характеристики направленості перетворювача з електродуванням: $1^\circ - 180^\circ$, частота падаючої на оболонку хвилі – $11500, Гц$. Характер кривої у всіх трьох випадках є однаковим, який є характерним для напівелектродованого перетворювача. Розмах графіку характеристики направленості став набагато більшим, це зумовлено тим, що на даній частоті домінує друга мода, нульова та перша моди також вносять значну частку згідно рис. 5. Мінімальних значень характеристика направленості набуває на куті 180° , яка дорівнює $0,974$. Максимальних значень характеристика направленості набуває на кутах 0° та 180° , яка дорівнює 1, і ця область відповідає зоні освітленості.

Висновки

В результаті проведеної роботи отримано графіки кутових розподілів амплітуд та фаз сумарних переміщень; графіки дотичних, нормальних та сумарних переміщень; графіки кутових розподілів амплітуд та фаз тисків; характеристики направленості перетворювача.

Встановлено, що:

- Фаза переміщень точок оболонки в напрямку

падіння звукової хвилі рівна нулю, при цьому напрями переміщень точок поверхні співпадають – за рахунок цього оболонка набуває осцилюючого характеру руху. Точки

поверхні оболонки набувають руху в бокових напрямках за рахунок пружності оболонки.

- Зв'язок між значеннями звукового поля та значеннями переміщень оболонки можна чітко прослідкувати. Областям звукової тіні відповідають області з мінімальними переміщеннями оболонки, і навпаки в звукоосвітлених областях переміщення оболонки досягають свого максимуму.
- Характеристика направленості електроакустичного перетворювача залежить від величини прикладеного навантаження на електроди, кутів нанесення електродів, частотної області, яка вивчається.
- Варто відзначити, що хоча ми і розглядаємо одиночний перетворювач, для якого характерна низька ступінь зв'язаності коливань, формування розсіяного поля відбувається за умов складного характеру переміщень точок поверхні оболонки. Таким чином, навіть при збудженні оболонки, на частотах, де ми прогнозуємо виключно пульсуючий або осцилюючий характер, зв'язаність по середовищу призведе до появи коливань невісесиметричного характеру. Причому внески модових складових згину ($n = 2,3$), можуть мати рівнозначний ваговий коефіцієнт з нульовою модою для певних випадків збудження оболонки.

Література

1. Коржик А.В., Лейко О.Г. Формування характеристик направленості одиночного приймального електропружного циліндричного перетворювача з розрізними електродами // Наукові Вісті: НТУУ «КПІ». – 2005. – №1 – с 50-55.
2. Коржик А.В., Лейко О.Г. Дослідження акустичних характеристик одиночного п'єзокерамічного циліндричного перетворювача при розв'язанні задачі прийому в наскрізній постановці // Наукові Вісті: НТУУ «КПІ». – 2002. – №5 – с 105-113.
3. Коржик А.В., О. Г. Лейко, До питання дифракції плоскої акустичної хвилі на електродпружному циліндричному прийомному перетворювачі, Електроніка та зв'язок, №4 – с 97-108.
4. Гринченко В.Т., Вовк И.В. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – Киев, Наук. думка, 1986. – 240 с.
5. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Електроакустичні пьезокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування,

- конструювання). Навчальний посібник. – Кіровоград, «Імекс ЛТД», 2006. – 448 с.
6. *Петрищев О. Н.* Гармонические колебания пьезокерамических элементов/ Часть 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса-антирезонанса. – КиевЖ АБЕРС, – 2012. – 299 с.

УДК 534.3

Исследование акустических характеристик цилиндрического пьезокерамического преобразователя с разрезными электродами

А. В. Бурлаченко, А.В. Коржик, д-р техн. наук, **К.Н. Скирдов**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

В работе изучаются акустические и механические характеристики пьезокерамического электроупругого цилиндрического преобразователя для разных условий электродирования для заданного диапазона частот, а именно: распределения амплитуд и фаз сумарных перемещений; диаграммы касательных, нормальных и суммарных перемещений; диаграммы угловых зависимостей амплитуд и фаз давлений; характеристики направленности преобразователя. Мы рассматриваем несколько условий электродирования преобразователя, а именно: $1^\circ - 30^\circ; 1^\circ - 90^\circ; 1^\circ - 180^\circ$. Также в работе приведены результаты анализа полученных данных с учетом выбранного диапазона частот и влияния модовых составляющих. Для решения задачи использовался метод насквозной постановки. Библи. 6, рис. 10.

Ключевые слова: преобразователь, разрезные электроды, пьезокерамика, механические характеристики, акустические характеристики, характеристики направленности.

UDC 534.3

Investigation of the acoustic characteristics of cylindrical piezoelectric transducer with a split electrodes

A.V. Burlachenko, O.V. Korzhyk, Dr.Sc., **K.N. Skirdov**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,
st. Politechnique, 16, Киев, 03056, Ukraine.

In the article acoustical and mechanical characteristics of electroacoustical cylindrical piezoceramic radially polarized receiver with devided electrods are investigated, being specific: distributions of the amplitudes and phases of the total displacement; charts of tangent, normal and total displacement; charts of angular distributions of the amplitudes and phases of pressure; directional characteristics of the receiver. We consider several cases of electrodes of receiver, namely: $1^\circ - 30^\circ; 1^\circ - 90^\circ; 1^\circ - 180^\circ$. Also in the paper are presented the analysis of the data based on the selected frequency range and impact of modal components. To solve the problem we used method of throughout statement. References 6, figures 10.

Keywords: transducer, devided electrods, piezoceramic, mechanical characteristics, acoustical characteristics, directional characteristics.

References

1. *Korzhyk O.V., Leiko O.G.* (2005), "Formation of the directivity characteristics of a single cylindrical receiving elektropruzhnoho converter with split electrodes". Research Bulletin. NTUU «KPI», no. 1, pp. 50-55.
2. *Korzhyk O.V., Leiko O.G.* (2002), "Investigation of acoustic characteristics of a single cylindrical piezoceramic transducer in solving problems in a through reception setting". Research Bulletin. NTUU «KPI». no. 5, pp. 105-113.
3. *Korzhyk O.V., Leiko O.G.* (2000), "On the question of diffraction of a plane acoustic wave by a cylindrical elektropruzhnomu foster converters". Electronics and Communication, no. 4, pp. 97-108.
4. *Grinchenko V.T., Vovk I.V.* (1986), "The wave scattering of sound nauprugih shells". Kiev, Scientific thought. P. 240. (Rus)
5. *Didkovskiy V.S., Leiko O.G. Savin V.G.* (2006), "Electrical pyezokeramical converters (calculation, design, construction). Tutorial". Kirovograd, «Imesk LTD». P. 448. (Rus)
6. *Petrishchev O.N.* (2012), "Harmonic vibrations of piezoceramic elements / Part 1. Harmonic vibrations of piezoceramic elements in a vacuum and the method of resonance-antiresonance". Kiev, AVERS. P. 299. (Rus)

Поступила в редакцию 27 мая 2013 г.