

Акустичні прилади та системи

УДК 539.3

DOI: [10.20535/2523-4455.2017.22.5.95752](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2017.22.5.95752)

Електромеханічна чутливість круглих та кільцевих п'єзоелектричних тонких пластин при механічному збуренні

Безверхий О. І., д.ф.-м.н., ORCID [0000-0002-0834-6335](https://orcid.org/0000-0002-0834-6335)
e-mail o_bezver@ukr.net

Національний транспортний університет
м. Київ, Україна

Григор'єва Л. О., к.ф.-м.н., ORCID [0000-0001-7013-0327](https://orcid.org/0000-0001-7013-0327)
e-mail l_grigoryeva@ukr.net

Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України
м. Київ, Україна

Реферат—Досліджується реакція п'єзокерамічних осьових датчиків з чутливим елементом в формі круглих та кільцевих пластин на імпульсне механічне навантаження. Визначається електрорушійна сила п'єзокерамічних поляризованих по товщині пластин при механічному навантаженні, прикладеному паралельно до напрямку поляризації. Розглядаються планарні нестационарні осесиметричні коливання пластини, що виникають при цьому. Проаналізовано зміну динамічних характеристик електромеханічного стану п'єзокерамічної пластини, встановлено залежність характеру нестационарних коливань від навантаження та відношення радіусів пластини при імпульсному навантаженні. Аналізується зміна ЕРС датчика в процесі реакції на нестационарне збурення.

Бібл. 15, рис. 6

Ключові слова — п'єзокерамічні круглі та кільцеві пластини; нестационарні пружноелектричні коливання; механічне збурення; електрорушійна сила п'єзоелемента.

І. Вступ

П'єзокерамічні датчики перетворюють механічне навантаження в пропорційний електричний сигнал. В умовах активного впровадження комп'ютерної техніки датчики є незамінними пристроями, що дозволяють узгоджувати механічні системи з електронними системами контролю і керування. Одним з основних типів п'єзокерамічних датчиків є осьові датчики, в яких механічне навантаження діє вздовж вісі поляризації. В якості п'єзоелементів в цих датчиках виступають поляризовані по товщині диски, кільця, циліндри і пластини [1, 2, 3 та ін.], які при імпульсних механічних навантаженнях можуть використовуватися як датчики акустичної емісії. Коливання тіл вказаної геометрії при гармонічних і імпульсних навантаженнях досліджувалися в [4, 5, 6, 7 та ін.].

Осьові датчики працюють в режимі прямого п'єзо-ефекту і є джерелом електричного струму. В реальних умовах датчик знаходиться під впливом електричного та механічного навантаження одночасно, але в лінійній постановці є зміст в окремому розгляді реакції тіла на електричне та механічне збурення. Нестационарні коливання п'єзокерамічних кільцевих

пластин в наближенні плоского напруженого стану при електричних збуреннях досліджувалися в [8].

Електрична напруга на розімкнутих електродах п'єзоелектричного елемента є його електрорушійною силою як джерела струму. Аналіз літератури вказує на недостатню дослідженість та актуальність проблеми визначення ЕРС. Наприклад, в роботі [9] досліджувалась ЕРС п'єзоелектричних циліндрів при гармонічних навантаженнях. Підхід до визначення ЕРС для пластинчастих елементів в нестационарному випадку запропонований в [10], реалізований в [11]. У даній роботі визначено ЕРС та досліджено електро-механічний стан п'єзокерамічних датчиків в формі поляризованих по товщині круглих та кільцевих пластин при імпульсному механічному збуренні.

ІІ. ОСНОВНІ ЗАЛЕЖНОСТІ.

Вивчається динамічний осесиметричний електро-механічний стан поляризованих по товщині п'єзокерамічних круглих і кільцевих пластин. Розглядається пластина на жорсткій основі під дією тиску $P(r,t)$, прикладеного до плоскої поверхні. Силою тертя між пластиною та основою нехтуємо. Очевидно, що при



такому навантаженні перш за все виникають товщинні коливання, які детально досліджені в [12]. На жаль, перехід до усталеного режиму в [12] не виконано, оскільки не відомі параметри в'язкості матеріалу. Товщинні коливання при нестационарних механічних (ударних) навантаженнях виникають в усіх типах тонкостінних (оболонкових) структур, але загальноприйнятий підхід до розв'язання задач теорії пластин та оболонок [13, 14] базується на нехтуванні ними внаслідок тонкостінності тіла та відносно малого часу виходу на усталений режим, а навантаження умовно прикладається до серединної поверхні. В нашому випадку відношення часу пробігу хвилі вздовж радіусу до часу пробігу хвилі по товщині пропорційне до відношення $R/h \gg 10$. Враховуючи це, робимо припущення про сталість напружень $\sigma_{zz} = P(r, t)$ по товщині пластини [5, 6], тобто нехтуємо часом виходу на стаціонарний режим товщинних коливань. При цьому параметри електромеханічного стану незалежні від координати z , тобто мають місце планарні коливання пластини (вздовж координати r). Зауважимо, що така постановка задачі можлива лише в межах теорії електропружності.

Координата r змінюється в межах $R_0 \leq r \leq R_1$, товщина пластини h . Коливання тіла в загальному випадку описуються рівнянням руху [5]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}. \quad (1)$$

Вирази для напружень запишемо в зручному для круглих пластин вигляді [5, 6]

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{s_{11}^E(1-\nu_E^2)} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \nu_E \frac{u_r}{r} \right) - \\ &- \frac{s_{13}^E}{s_{11}^E(1-\nu_E)} P_z - \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\nu_E)} E_z, \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{s_{11}^E(1-\nu_E^2)} \left(\nu_E \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \right) - \\ &- \frac{s_{13}^E}{s_{11}^E(1-\nu_E)} P_z - \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\nu_E)} E_z, \end{aligned} \quad (2)$$

де $s_{11}^E, s_{12}^E, s_{13}^E, d_{13}$ – матеріальні константи залежності деформацій від напружень та напруженості при сталій напруженості електричного поля, $\nu_E = -s_{12}^E / s_{11}^E$ – аналог коефіцієнта Пуасона.

Рівняння коливань (1) в переміщеннях зводиться до вигляду

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} - s_{13}^E (1+\nu) \frac{\partial P_z}{\partial r} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Тут швидкість поширення електропружної хвилі

$$a^2 = \frac{1}{(1-\nu_E^2) s_{11}^E \rho}.$$

З (2) маємо

$$\begin{aligned} \sigma_r + \sigma_\theta &= \\ &= \frac{1}{s_{11}^E(1-\nu_E)} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} - 2d_{31}E_z - 2s_{13}^E P_z \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Електрична індукція в загальному випадку визначається за формулою

$$D_z = d_{13}(\sigma_r + \sigma_\theta) + d_{33}\sigma_z + \varepsilon_{33}^T E_z. \quad (5)$$

Напруженість електричного поля

$$E_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z}.$$

Для пластин, товщина яких набагато менша за планарний розмір, вважаємо [10], що електричний потенціал всередині тіла змінюється за лінійним законом

$$\phi = \frac{U(t)}{h} z,$$

звідки

$$E_z = -\frac{U(t)}{h}. \quad (6)$$

Тут $U(t)$ – шукана електрорушійна сила перетворювача, яка визначається з умови рівності нулеві струму при розімкнутих електродах [10] (режим холостого ходу)

$$I = \frac{dQ}{dt} = -\iint_{A^\pm} \frac{dD_z}{dt} dA^\pm = 0, \quad (7)$$

де A^\pm – електродована поверхня пластини, Q – заряд на електродах.

З (7) випливає

$$Q = -\iint_{A^\pm} D_z dA^\pm = \text{const}. \quad (8)$$

З (5), (4), (6) маємо

$$\begin{aligned} D_z &= \frac{d_{13}}{s_{11}^E(1-\nu_E)} \frac{1}{r} \frac{\partial r u_r}{\partial r} + \\ &+ \left(d_{33} - \frac{2d_{13}s_{13}}{s_{11}^E(1-\nu_E)} \right) P(r, t) - \\ &- \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{2d_{13}^2}{s_{11}^E(1-\nu_E)} \right) \frac{U(t)}{h}. \end{aligned} \quad (9)$$

Якщо плоскі поверхні пластини повністю покриті електродами, то $A^\pm = A_{nn} = \pi(R_1^2 - R_0^2)$. Інтегруємо (8) з врахуванням (9):

$$\begin{aligned}
-Q = & \frac{2\pi d_{13}}{s_{11}^E(1-\nu_E)} (R_1 u_r(R_1, t) - R_0 u_r(R_0, t)) + \\
& + (d_{33} - \frac{2d_{13}s_{13}}{s_{11}^E(1-\nu_E)}) \int_A P(r, t) dA - \\
& - (\varepsilon_{33}^T - \frac{2d_{13}^2}{s_{11}^E(1-\nu_E)}) \frac{U(t)}{h} A_{nl}.
\end{aligned} \quad (10)$$

Якщо при $t = 0$ заряд $Q(0) = 0$, то $Q(t) = 0$. З (10) отримуємо вираз для знаходження електрорушійної сили

$$\begin{aligned}
U(t) = & \frac{\pi h k_p^2}{d_{13} A^\pm (1 - k_p^2)} \times \\
& \times (R_1 u_r(R_1, t) - R_0 u_r(R_0, t)) + \frac{h}{\varepsilon_{33}^T (1 - k_p^2) A^\pm} \times \\
& \times (d_{33} - \frac{2d_{13}s_{13}}{s_{11}^E(1-\nu_E)}) \int_A P(r, t) dA.
\end{aligned} \quad (11)$$

Тут $k_p^2 = \frac{2d_{13}^2}{s_{11}^E(1-\nu_E)\varepsilon_{33}^T}$ – планарний коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Формула (11) дійсна як для кільцевих, так і для круглих пластин при $R_0 = 0$.

Перетворимо вираз для σ_r :

$$\begin{aligned}
\sigma_r = & \frac{1}{s_{11}^E(1-\nu_E^2)} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \nu_E \frac{u_r}{r} - s_{13}^E(1+\nu) P_z + \right. \\
& + \frac{\pi k_p^2(1+\nu_E)}{A_{nl}(1-k_p^2)} (R_1 u_r(R_1, t) - R_0 u_r(R_0, t)) + \\
& \left. + \frac{(1+\nu_E)d_{31}d_{33}}{\varepsilon_{33}^T(1-k_p^2)A^\pm} \int_A P_z dA. \right)
\end{aligned} \quad (12)$$

Циліндричні поверхні пластини можуть бути закріплені або вільні від навантаження:

$$\sigma_r(R_i, t) = 0 \vee u_r(R_i, t) = 0, \quad i = 0, 1. \quad (13)$$

У початковий момент часу задаються переміщення точок пластини і їх швидкості

$$u_r(r, t=0) = u(r), \quad \frac{\partial u_r}{\partial t}(r, t=0) = v(r). \quad (14)$$

Для загальності розв'язку перейдемо до безрозмірних величин

$$\begin{aligned}
\bar{r}R = r, \\
\bar{u}_r R = u_r, \quad \bar{t} = \frac{at}{R}, \quad \bar{U}(t) = \frac{d_{13}}{h} U(t).
\end{aligned} \quad (15)$$

Підставляючи (15) в (3), отримуємо рівняння коливань в безрозмірних змінних при незалежності зовнішнього навантаження від координати r

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_r}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial \bar{r}} - \frac{\bar{u}_r}{\bar{r}^2} = \frac{\partial^2 \bar{u}_r}{\partial \bar{t}^2}. \quad (16)$$

Рівняння для напружень (2) обезрозмірюються наступним чином:

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma}_r = & \sigma_r s_{11}^E(1-\nu_E^2) = \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial \bar{r}} + \nu_E \frac{\bar{u}_r}{\bar{r}} - \\
& - \frac{s_{13}}{s_{11}^E(1-\nu_E)} \bar{P}_z + (1+\nu_E) \bar{U}(t),
\end{aligned} \quad (17)$$

Рівняння руху (16) при початкових мовах (14) інтегруються за допомогою різнищевих виразів, описаних в [8, 11]. Значення переміщень в законтурних точках визначаються з системи рівнянь, що випливає з граничних умов (13). При відсутності напружень на зовнішніх поверхнях при введенні розбиття з (12) випливає

$$\begin{aligned}
\frac{aR_1}{2} u_{n+1} + \left(-\frac{aR_0}{2} + \frac{\nu}{2R_0} - \frac{1}{\Delta} \right) u_0 = \\
= bP_z - \left(-\frac{aR_0}{2} + \frac{\nu}{2R_0} + \frac{1}{\Delta} \right) u_1 - \frac{aR_1}{2} u_n, \\
\left(\frac{aR_1}{2} + \frac{\nu}{2R_1} + \frac{1}{\Delta} \right) u_{n+1} - \frac{aR_0}{2} u_0 = \\
= bP_z - \left(\frac{aR_1}{2} + \frac{\nu}{2R_1} - \frac{1}{\Delta} \right) u_n + \frac{aR_0}{2} u_1,
\end{aligned}$$

$$\text{де } a = \frac{\pi k_p^2(1+\nu_E)}{A^\pm(1-k_p^2)},$$

$$b = (1+\nu_E) \times$$

$$\times \left(\frac{d_{13}}{\varepsilon_{33}^T(1-k_p^2)} \left(\frac{2d_{13}s_{13}}{s_{11}^E(1-\nu_E)} - d_{33} \right) + s_{13}^E \right).$$

III. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.

Проведемо аналіз реакції п'єзокерамічної пластини на механічний тиск, прикладений до поверхні датчика. Зовнішній радіус R_1 , інші пропорції $\frac{R_1}{h} = 20$, $\frac{R_0}{R_1} = 0, 0.2, 0.4, 0.6$. Матеріал пластини — п'єзокераміка ЦТС -19, для якої маємо такі матеріальні параметри [5, 6]:

$$\begin{aligned}
s_{11}^E = 15,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 / \text{Н}, \quad s_{12}^E = -5,8 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 / \text{Н}, \\
s_{13}^E = -5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 / \text{Н}, \quad d_{13} = -125 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} / \text{Н}, \\
d_{33} = 306 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} / \text{Н}, \quad \varepsilon_{33}^S = 1360 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} / \text{м}, \\
\rho = 7740 \text{ кг} / \text{м}^3.
\end{aligned}$$

Для даного матеріалу швидкість поширення збурень в радіальному напрямку $a = 3144 \text{ м} / \text{с}$, в напрямку поляризації $c_z = 3996 \text{ м} / \text{с}$. Звідси визначаємо відношення часу пробігу хвилі вздовж радіусу до часу пробігу хвилі по товщині для круглої пластини $\frac{T_r}{T_h} = \frac{Rc_z}{ha} = 25$, для кільцевої пластини $R_1 = 0.6R_0$



маємо $\frac{T_r}{T_h} = \frac{(R_0 - R_1)c_z}{ha} = 10$. Таким чином, для дослі-

дження планарних коливань пластини ми можемо не враховувати товщинні коливання. При невеликих відношеннях R/h матимемо часи пробігу одного порядку, і тоді виникає необхідність в розв'язанні двовимірної зв'язаної задачі [15].

Розглянемо реакцію пластини на миттєво прикладений при $t=0$ по всій площі пластини тиск

$$P(t) = \begin{cases} P \sin \frac{t_1}{\pi} t, & 0 \leq t \leq t_1, \\ 0, & t > t_1 \end{cases} \text{ при вільних бічних повер-}$$

хнях $\sigma_r(R_0, t) = 0$, $\sigma_r(R_1, t) = 0$. Для обчислень візь-
мемо $\bar{P} = 1$, час навантаження $\bar{t}_1 = \pi$, що відповідає інтервалу $0 \leq t \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ c}$. Відповідне розмірне значення тиску $P = 76,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$. При навантаженні, скажімо, $P = 1 \text{ МПа}$ отримані результати потрібно поділити на $76,8 \cdot 10^3$ і привести до розмірних значень за допомогою співвідношень (15), (17).

На рис. 1, 2 наведені безрозмірні динамічні криві переміщень внутрішньої $r = R_0$ та зовнішньої $r = R_1$ поверхні для пластин з різними внутрішніми отворами. Бачимо, що максимальні переміщення внутрішнього контуру для пластин з $R_0 = 0.4$ і $R_0 = 0.6$ практично однакові, тоді як при $R_0 = 0.2$ отримуємо на 30% менші переміщення. Періодичність коливань після зняття навантаження відповідає часу пробігу прямої і зворотної електропружної хвилі вздовж радіуса пластини.

Зі зростанням внутрішнього радіусу максимальні переміщення зростають і періодичність коливань в різних точках пластини однакова. Максимальні переміщення для кільцевих пластин виникають на поверхні внутрішнього отвору.

Напружений стан пластини вивчимо за допомогою рис. 3, 4. На рис. 3 бачимо динамічні криві радіальних напружень в перерізі $r = (R_0 + R_1) / 2$ пластин. Із зростанням внутрішнього радіусу радіальні напруження зменшуються. Аналіз отриманих результатів показує, що в круглій пластині максимальні радіальні напруження в точці $r = 0$ нижчі за напруження в розглянутому перерізі на 7%.

Окружні напруження в пластині досягають максимальних значень при $r = R_0$. Бачимо, що при зростанні внутрішнього радіусу максимальні окружні напруження зменшуються, але все одно помітно вищі за максимальні радіальні напруження в кільцевих пластинах.

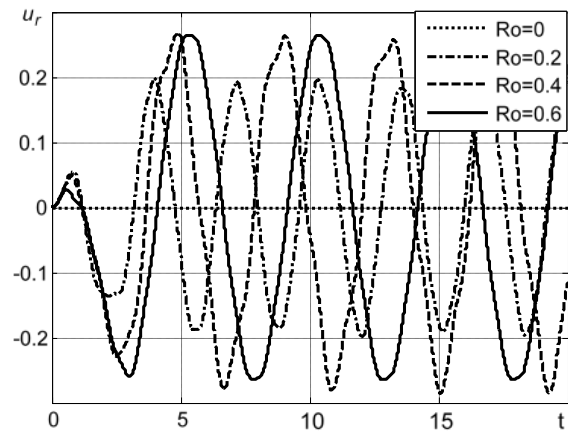


Рис. 1 Переміщення внутрішньої поверхні для пластин з різними отворами

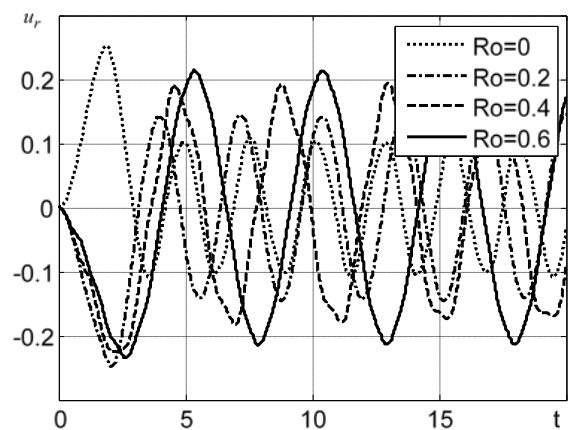


Рис. 2 Переміщення зовнішньої поверхні для пластин з різними отворами

Результати визначення електрорушійної сили наведено на рис. 5. Механічне навантаження в формі гілки синусоїди знято в момент $t = \pi$, що чітко відобразилося на графіку. Після цього моменту для всіх розглянутих пластин спостерігаються коливальні зміни ЕРС з амплітудою одного порядку, але різною частотою, яка залежить від ширини пластини. Для суцільної пластини пік ЕРС виявився більше ніж в два рази нижчим за ЕРС пластин з отвором.

З рис. 6 бачимо, що з збільшенням часу контакту амплітуда першого піку ЕРС дещо збільшується. Після зняття навантаження зміна ЕРС описується комбінацією радіальних та товщинних коливань з майже однаковою амплітудою, за виключенням випадку $\bar{t}_1 = 2\pi$. Амплітуда цих коливань не перевищує 10% від ЕРС під час навантаження.

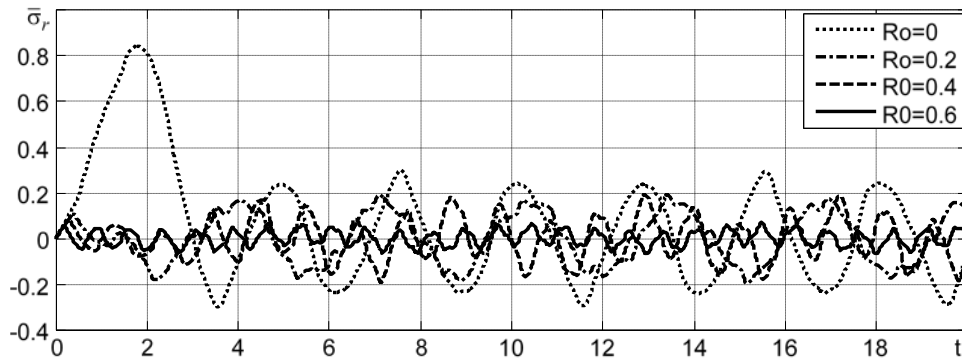
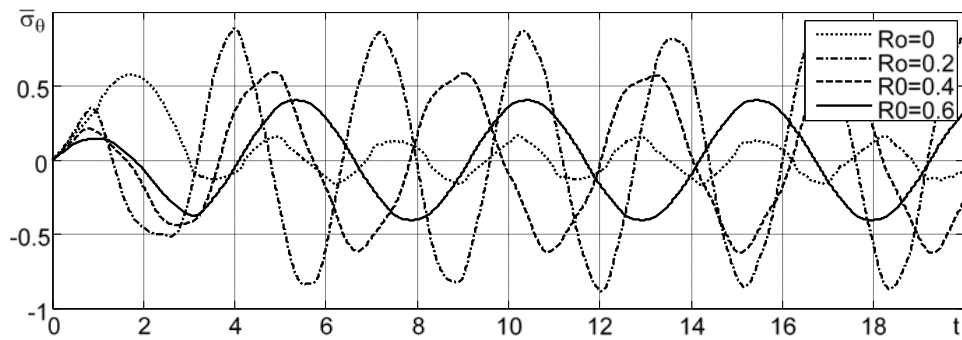
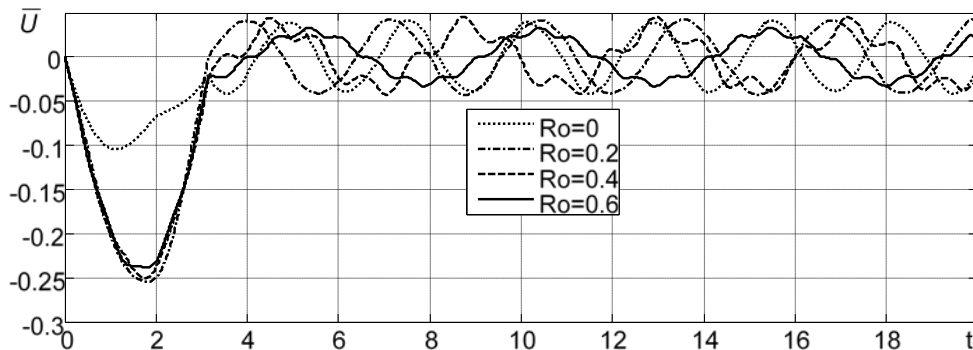
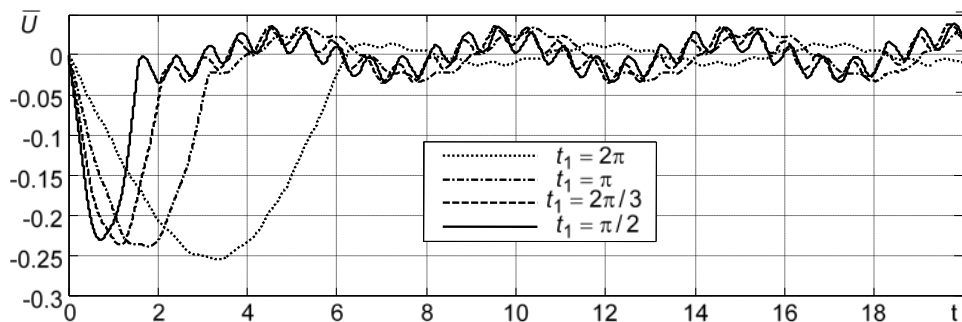
Рис. 3 Радіальні напруження в перерізі $r = (R_0 + R_1) / 2$ Рис. 4 Окружні напруження в перерізі $r = R_0$ 

Рис. 5 ЕРС пластин з різними радіусами

Рис. 6 ЕРС пластини $R_0 = 0.6$ при різних інтервалах збудрення

ВИСНОВКИ

В роботі реалізовано спосіб визначення ЕРС для робочих елементів осьових п'єзодатчиків в формі круглих та кільцевих п'єзокерамічних пластин. Дослідження динамічного електромеханічного стану пластини, що стає відомим при цьому, може бути використано при проектуванні та виборі оптимальних умов функціонування п'єзокерамічного перетворювача. Встановлено, що наявність отвору в пластині зменшує механічні напруження та підвищує значення ЕРС в момент піку імпульсного навантаження. Вільні коливання ЕРС, що виникають після зняття навантаження, мають приблизно однакову амплітуду та період, що залежить від ширини пластини. Цим самим ілюструється необхідність дослідження реакції електромеханічних перетворювачів на імпульсне навантаження саме в початковий інтервал часу.

ПОДЯКА

Автори бажають висловити щиру вдячність д.т.н., проф. Петрищеву О.Н. за висловлені зауваження та пропозиції по розглянутій задачі.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] W. P. Mason, "Piezoelectricity, its history and applications," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70, no. 6, pp. 1561-1566, 1981. DOI: [10.1121/1.387221](https://doi.org/10.1121/1.387221)
- [2] I. J. Busch-Vishniac, *Electromechanical Sensors and Actuators*, New York: Springer, 1999. ISBN: [978-1-4612-1434-2](https://www.isbn-international.org/product/978-1-4612-1434-2)
- [3] V. S. Didkovskiy; A. G. Leiko; V. G. Savin, *Elektroakustichni peretvoryuvachi (rozrakhunok, proektuvannya, konstruyuvannya)* [Electro-acoustic converters (calculation, design, construction)], Kyiv: NTUU "KPI", 2006, p. 448.
- [4] O. N. Petrishchev, *Garmonicheskie kolebaniya pezoeramicheskikh elementov. Chast 1. Garmonicheskie kolebaniya pezoeramicheskikh elementov v vakuume i metod rezonansa - antirezonansa* [Harmonic vibrations of piezoceramic elements. Part 1. Harmonic vibrations of piezoceramic elements in a vacuum and method of resonance-antiresonance], p. 1, Kyiv: Avers, 2012, p. 299.
- [5] N. A. Shul'ga; A. M. Bolkisev, *Kolebaniya pezoelektricheskikh tel* [Vibrations of piezoelectric bodies], Kyiv: Naukova dumka, 1990, p. 228.
- [6] M. O. Shul'ga, V. L. Karlash, *Rezonansni elektromekhanichni kolyvannia pezoelektrichnykh plasty* [Resonant electromechanical vibrations of piezoelectric plates], Kyiv: Naukova dumka, 2008.
- [7] D. Mančić; V. Dimić; M. Radmanović, "Resonance Frequencies of PZT Piezoceramic Disks: A Numerical Approach," *Facta Universitatis Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics*, vol. 3, no. 12, pp. 431-442, 2002.
- [8] N. A. Shul'ga; L. O. Grigor'eva; N. O. Babkova, "Electrically Excited Nonstationary Vibrations of Thin Circular Piezoelectric Plates," *International Applied Mechanics*, vol. 50, no. 4, p. 406-411, July 2014. DOI: [10.1007/s10778-014-0644-8](https://doi.org/10.1007/s10778-014-0644-8)
- [9] A. M. Bolkisev; S. I. Rudnickiy; N. A. Shulga, «Elektroakusticheskaya chuvstvitel'nost' pezoeramicheskogo tsilindra pri garmonicheskom nagruzhenni [Electroacoustic sensitivity of piezoceramic cylinder with harmonic loading],» *Prikladnaya Mehanika*, vol. 25, no. 12, pp. 68-73, 1989.
- [10] M. O. Shulga, «Viznachennia elektrorushlinoi syly pezoelektrichnykh peretvoriuvachiv pri mekhanichnikh navantazhenniakh [Definition of electromotive force of piezoelectric transducers at mechanical loads],» *Rep. NAS of Ukraine*, № 1, pp. 70-74, 2009.
- [11] L. O. Grigoryeva; A. A. Kirichenko; N. A. Babkova, «Viznachennia elektrorushlinoi syly poliarizovanoi po tovshchyni kiltsevoi plasty pri mekhanichnomu zburenni [Definition of electromotive force of polarized by thickness circular plate at mechanical perturbation],» *Strength of materials and theory of structures*, no. 93, pp. 47-55, 2014.
- [12] N. A. Shul'ga; L. O. Grigor'eva, "Method of characteristics in electroelastic analysis of a layer subject to dynamic mechanical loading," *International Applied Mechanics*, vol. 45, no. 1, pp. 66-72, January 2009. DOI: [10.1007/s10778-009-0164-0](https://doi.org/10.1007/s10778-009-0164-0)
- [13] A. E. Babayev, *Nestatsionarnyye volnyi v sploshnykh sredakh s sistemoy otrazhayuschih poverhnostey* [Unsteady waves in continuous media with a system of reflective surfaces], Kyiv: Naukova dumka, 1990, p. 176.
- [14] A. K. Pertsev; E. G. Platonov, *Dinamika obolochek i plastin (nestatsionarnyye zadachi)* [Dynamics of shells and plates (unstationary problems)], Leningrad: Sudostroenie, 1987, p. 318.
- [15] L. O. Grigor'eva, "Vibrations of a piezoceramic cylinder subject to nonstationary electric excitation," *International Applied Mechanics*, vol. 43, no. 3, pp. 303-308, March 2007. DOI: [10.1007/s10778-007-0025-7](https://doi.org/10.1007/s10778-007-0025-7)

Надійшла до редакції 14 березня 2017 року

УДК 539.3

Электромеханическая чувствительность круглых и кольцевых пьезоэлектрических тонких пластин при механическом возбуждении



Безверхий А. И., д.ф.-м.н., ORCID [0000-0002-0834-6335](https://orcid.org/0000-0002-0834-6335)

e-mail o_bezver@ukr.net

Национальный транспортный университет
г. Киев, Украина

Григорьева Л. О., к.ф.-м.н., ORCID [0000-0001-7013-0327](https://orcid.org/0000-0001-7013-0327)

e-mail l_grigoryeva@ukr.net

Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины
г. Киев, Украина

Реферат—Исследуется реакция пьезокерамических осевых датчиков с чувствительным элементом в форме круглых и кольцевых пластин на импульсное механическое нагружение. Определяется электродвижущая сила пьезокерамических поляризованных по толщине пластин при нагружении, приложенном параллельно направлению поляризации. Рассматриваются планарные нестационарные осесимметричные колебания пластины, возникающие при этом. Проанализировано изменение динамических характеристик электромеханического состояния пьезокерамической пластины, установлена зависимость характера нестационарных колебаний от нагрузки и отношения радиусов пластины при импульсной нагрузке. Анализируется изменение ЭДС датчика в процессе реакции на нестационарное возмущение.

Библ. 15, рис. 6.

Ключевые слова — пьезокерамические круглые и кольцевые пластины; нестационарные упругоэлектрические колебания; механическое возмущение; электродвижущая сила пьезоэлемента.

UDC 539.3

Electromechanical sensitivity of round and circular piezoelectric thin plates at mechanical disturbance

O. I. Bezverhyi, Dr.Sc.(Phys.-Math.), ORCID [0000-0002-0834-6335](https://orcid.org/0000-0002-0834-6335)

e-mail o_bezver@ukr.net

National Transport University
Kyiv, Ukraine

L. O. Grigoryeva, PhD(Phys.-Math.), ORCID [0000-0001-7013-0327](https://orcid.org/0000-0001-7013-0327)

e-mail l_grigoryeva@ukr.net

S. P. Timoshenko Institute of Mechanics
Kyiv, Ukraine

Abstract—Response of axial piezoceramic sensors with sensing element in the form of round and circular plates at the mechanical pulse loading is studied. Electromotive force of polarized by thickness piezoceramic plate at mechanical load applied parallel to the direction of polarization is determined. Transient planar axisymmetrical vibrations of plates are considered. Changing of the electromechanical state dynamic characteristics of the piezoceramic plate is analyzed, dependence of the nature of unsteady fluctuations from loading and ratio of the plate radiuses under pulsed load. Change of sensor EMF at unsteady disturbance response is analyzed.

Ref. 15, fig. 6.

Keywords — round and circular piezoceramic plates; electromechanical transient vibrations; mechanical disturbance; electromotive force of the piezoelement.

