

УДК 620.179.1

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОШАРОВОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА ПРИ ОСЕМЕТРИЧНОМУ ЗГИНІ

© Лютак І. З., Кісіль І. С., 2000

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу.

Досліджено вплив геометричних і фізичних параметрів двошарового п'єзоелектричного чутливого елемента на його частотні характеристики. Визначено рівняння стану чутливого п'єзоелектричного елемента, а також краєві умови для розв'язку цього рівняння.

В останній час у зв'язку із відкриттям нових п'єзокерамічних матеріалів з високим коефіцієнтом електромеханічного перетворення різко зросли вимоги до п'єзокерамічних чутливих елементів. Підвищені п'єзоелектричні властивості елементів із сучасних п'єзокерамік дозволяють створювати перетворювачі різних форм і розмірів, що мають високі метрологічні характеристики, просту конструкцію і порівняно низьку вартість.

Вибір оптимальних параметрів п'єзоакселерометра дозволяє покращити його частотні характеристики і знизити величину розсіювання енергії. На зміну внутрішньої частоти п'єзоакселерометра значний вплив мають геометричні і фізичні проектні параметри акселерометра, а саме: інерційна маса, відношення товщин шарів (п'єзоелектричного до металічного), радіус п'єзоелектричної пластини та значення п'єзомодуля.

Для визначення впливу вищевказаних параметрів розглянемо конструкцію чутливого елемента

(ЧЕ) п'єзоакселерометра. ЧЕ представляє собою дві склеєні кільцеві пластини радіусами r_1 і r_2 , які закріплені в корпусі давача по внутрішньому радіусу, що рівний r_0 (рис. 1).

Розрахункова схема ЧЕ представляє собою двошарову пластину. Перший шар - поляризована по товщині п'єзокераміка, плоскі бокові поверхні якої покриті нескінченно тонкими електропровідними поверхнями малої жорсткості. Другий шар - пружна металічна пластинка. На границі розділу шарів відбувається стрибкоподібна зміна фізичних властивостей і характеристик матеріалу. Розглянемо ЧЕ як елемент з двома ділянками в радіальному напрямку. На першому $r_0 < r < r_1$ маємо двошарову пластину, на другому $r_1 < r < r_2$ - одношарову металічну пластину (рис. 1). Нехай товщина п'єзокераміки L_1 , її зовнішній радіус r_1 , товщина металічної пластини L_2 , її зовнішній радіус r_2 , $L=L_1+L_2$ - товщина всього пакету шарів. Загальна товщина пакету є малою в порівнянні з радіусом r_2 .

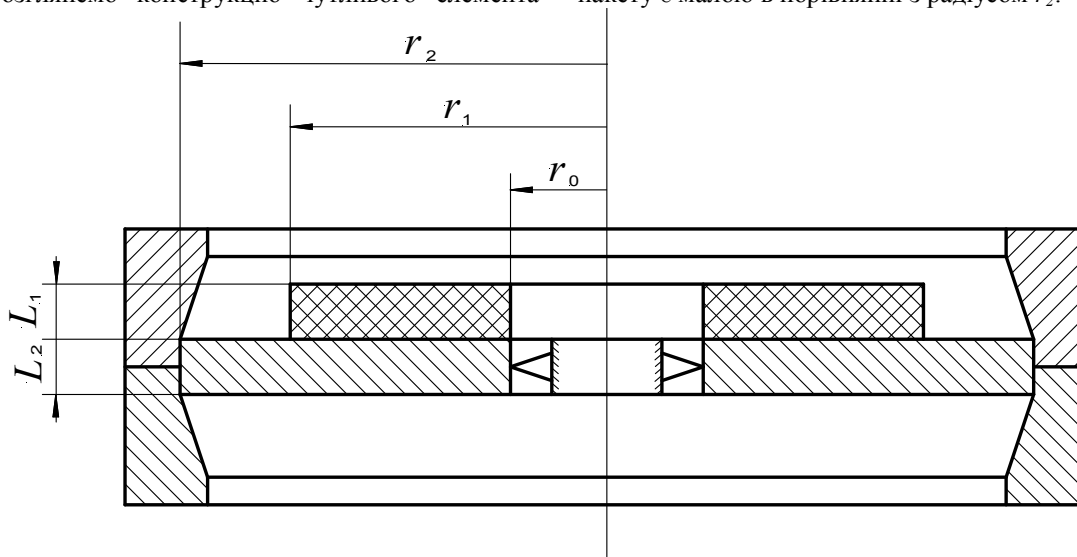


Рис. 1. Схема ЧЕ п'єзоелектричного акселерометра.

Для одержання рівнянь, які описують стан акселерометра, що характеризується механічними параметрами відносно власної частоти, скористаємося циліндричною системою координат (z, s, θ) (рис. 2). Нехай площина $z = 0$ в даній системі координат відповідає серединній площині всього пакета шарів. Відстань від серединної площини до поверхні розділу шарів $L^* = (L_1 - L_2)/2$.

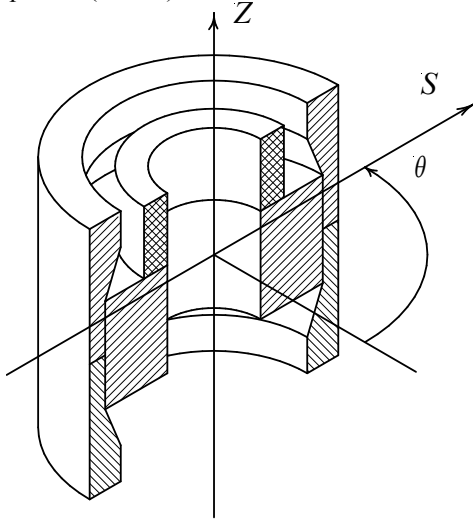


Рис. 2. Чутливий елемент в циліндричній системі координат.

Оскільки пластина коливається, а її прогин залежить тільки від координати s, θ і не залежить від z , то кут повороту нормалі ν до серединної поверхні пластини в радіальному напрямку, згідно теорії пружності, має такий вигляд [1]:

$$\nu = -\frac{dW_s}{ds}, \quad (1)$$

де W_s - прогин серединної поверхні.

Визначимо деформацію пакета шарів в координатах s і θ [1]:

$$\varepsilon_s = z \cdot \frac{d\nu}{ds}, \quad \varepsilon_\theta = z \cdot \frac{\nu}{r}. \quad (2)$$

Параметри зміни кривизни серединної поверхні для даного матеріалу в цих же координатах будуть такими:

$$\mu_s = \frac{d\nu}{ds}, \quad \mu_\theta = \frac{\nu}{r}. \quad (3)$$

Геометричні співвідношення (2) виконуються для пакета шарів в цілому. Фізичні співвідношення запишемо для кожного шару окремо, де індекс (1) відноситься до п'єзоелектричної пластини, а індекс (2) - до металічної пластини п'єзоакселерометра.

Знайдемо діючі в п'єзоелектричній пластині напруження σ_s, σ_θ , враховуючи напруженість електричного поля E_z [2]:

$$E_z = -\frac{V_0}{L_1} - \left(z - \frac{L_2}{2}\right) \frac{K_p^2 (\mu_s + \mu_\theta)}{2d_{31} (1 - K_p^2)}, \quad (4)$$

$$\sigma_s^{(1)} = k_1(z) \mu_s + k_2(z) \mu_\theta + \frac{V_0}{L_1} \cdot \frac{d_{31}}{S_{11} (1 - \nu)}, \quad (5)$$

$$\sigma_\theta^{(1)} = k_2(z) \mu_s + k_2(z) \mu_\theta + \frac{V_0}{L_1} \cdot \frac{d_{31}}{S_{11} (1 - \nu)},$$

де коефіцієнти $k_1(z), k_2(z)$ мають такий вигляд:

$$k_1(z) = \frac{1}{S_{11} (1 - \nu^2)} \left[z + \frac{1 + \nu}{2} \left(z - \frac{L_2}{2} \right) \frac{K_p^2}{1 - K_p^2} \right], \quad (6)$$

$$k_2(z) = \frac{1}{S_{11} (1 - \nu^2)} \left[\nu z + \frac{1 + \nu}{2} \left(z - \frac{L_2}{2} \right) \frac{K_p^2}{1 - K_p^2} \right]$$

де V_0 - прикладена до пластин різниця потенціалів, K_p^2 - планарний коефіцієнт електромеханічного зв'язку, ν - власна частота коливань пластини, d_{31} - п'єзомодуль, S_{11} - параметр п'єзокераміки.

Враховуючи напруження п'єзокерамічної пластини та рівняння механіки, які пов'язують напруження з деформаціями, визначимо напруження, що діє в металічній пластині:

$$\sigma_s^{(2)} = \frac{E_z z}{1 - \nu^2} (\mu_s + \nu \cdot \mu_\theta). \quad (7)$$

Враховуючи (7), розподіл моменту згину через напруженість в п'єзокерамічній пластині складатиме:

$$M_s = \int_{L^*}^{L_2} \sigma_s^{(1)} z dz + \int_{-L_2}^{L^*} \sigma_s^{(2)} z dz. \quad (8)$$

Для першої ділянки по радіусу пластини моменти згину мають вигляд (8), для другої - в виразі (8) будуть відсутні члени із верхнім індексом (1).

Для моментів пластини, які діють вздовж осі s рівняння мають згідно [3] такий вигляд:

$$Q_z = \frac{dM_s}{ds} + \frac{M_s - M_0}{r}, \quad (9)$$

$$\frac{d(rQ_z)}{ds} = -rL\Omega_z W_s,$$

де M_0 - початковий момент пакету шарів, Ω_z - напруження одиниці об'єму вздовж осі z .

Розглянемо задачу визначення спектру власних частот і відповідних форм коливань для акселерометра від вище вказаних механічних параметрів. Опишемо пакет шарів пластини вектором стану системи:

$$\bar{Y} = \{ W_s, \nu_s, M_s, Q_z \}. \quad (10)$$

Граничні умови, що рівносильні короткозамкненим електродам ($V_0=0$) для шарнірно з'єднаної по внутрішньому радіусу пластини мають вигляд [3, 4]:

$$W_s = 0, \quad M_s = 0, \quad (11)$$

або використовуючи (10) і, врахувавши граничні умови, запишемо:

$$H_0 \cdot \bar{Y} = 0, \quad (12)$$

де H_0 - прямокутна матриця розміром 2×4 ,
 $H_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$. Тоді рівняння стану пластини і граничні умови для її зовнішнього краю будуть такими:

$$M_s = 0, \quad r_2 Q_z - \frac{m\omega^2}{2\pi} W_s = 0 \quad \text{або} \quad H_1 \cdot \bar{Y} = 0, \quad (13)$$

де $H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{m\omega^2}{2\pi} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, m - інерційна маса, ω -

кутова частота власних коливань пластини.

На стику двох ділянок при $r = r_1$ повинна бути виконана така умова:

$$\bar{Y}(r_1 + 0) = \bar{Y}(r_1 - 0). \quad (14)$$

Власні частоти визначаються із умови існування розв'язку системи (12), який в свою чергу визначається рівністю нулю визначника цієї системи рівнянь, а саме:

$$\psi(\omega_s) = 0. \quad (15)$$

Використовуючи метод половинного ділення за

допомогою пакетів прикладних програм на ЕОМ отримуємо корені рівняння (13). На основі отриманих результатів побудуємо графіки залежності власної частоти чутливого елемента від його параметрів, таких як інерційна маса, відношення товщин шарів п'єзоелектрика до металічної пластини, радіуса п'єзоелектричної пластини, п'єзомодуля (рис. 3).

Враховуючи, що п'єзоелектричні ЧЕ мають нескінченний частотний спектр і ЧЕ даного типу працює на низьких дорезонансних частотах, то найбільший практичний інтерес мають значення першої власної частоти. На рис.3 приведені залежності нижчих власних частот ЧЕ від його геометричних параметрів для наступних основних незмінних параметрів ЧЕ: внутрішній радіус посадки ЧЕ в корпусі $r_0 = 0,4$ мм, зовнішній радіус несучої пластини $r_2 = 4$ мм, зовнішній радіус п'єзопластини $r_1 = 3,561$ мм, товщина п'єзопластини $L_1 = 0,25$ мм, несучої пластини $L_2 = 0,45$ мм, інерційна маса $m = 3$ г, матеріал п'єзокераміки ЦТС-19, його параметри: $S_{11} = 15,1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, $S_{12} = 5,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, $d_{31} = 120,10^{12} \text{ Кл/Н}$.

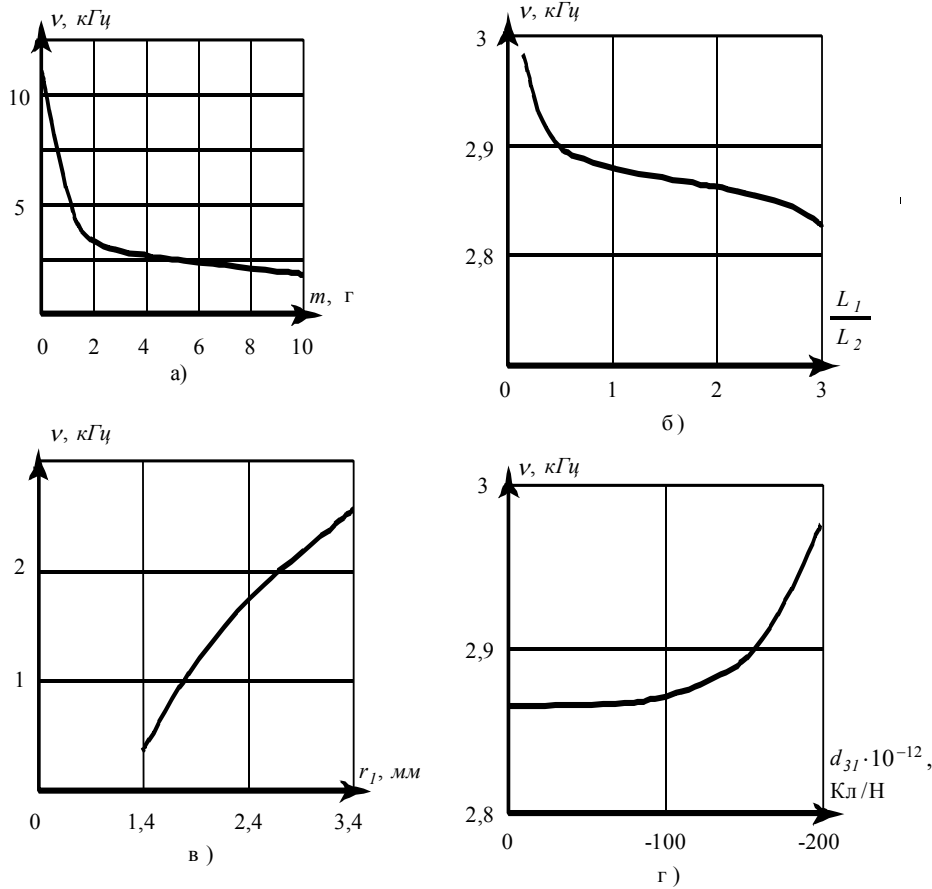


Рис. 3. Залежність власної частоти від геометричних і фізичних параметрів акселерометра.

На рис. 3а представлений графік залежності першої власної частоти ЧЕ від інерційної маси. Найбільш значна зміна власної частоти відбувається при збільшенні інерційної маси від 0 до 4 г.

На рис. 3б приведена залежність першої власної частоти від відношення товщин шарів при постійній загальній товщині. Із збільшенням цього відношення відбувається незначне зменшення власної частоти. При зміні L_1/L_2 від 0,1 до 3 ν зменшується від 2,98 кГц до 2,83 кГц, тобто на 5%. Це відбувається внаслідок того, що зменшення товщини несучої пластини призводить до зниження згинної жорсткості всього ЧЕ.

На рис. 3в представлена залежність власної частоти від зовнішнього радіуса п'єзоелектричної пластини. Із зменшенням цього радіуса зв'язано зменшення жорсткості ЧЕ, тому власна частота також зменшиться. При зміні радіуса на 2 мм власна частота зміниться на 34 %.

Залежність власної частоти ЧЕ від фізичної константи п'єзокераміки приведена на рис. 3г, звідки видно, що зміна п'єзомодуля в межах реальних значень для п'єзокераміки (для п'єзомодуля від 100 до 200 Кл/Н·10⁻¹²) практично не впливає на власну частоту. Наприклад, при зміні п'єзомодуля d_{31} у вказаних межах власна частота збільшується тільки на 3 %.

Аналіз залежності власних частот від параметрів ЧЕ показує, що дана схема має найбільшу першу резонансну частоту, значення інших більш високих частот є меншими за першу на два порядки. Тому

при наявності інерційної маси дана схема працює подібно схемі з одним ступенем свободи, розрахунок якої приведений в [4].

Отримані залежності власної частоти чутливого елемента п'єзоакселерометра від таких параметрів як п'єзомодуль, відношення товщин шарів (п'єзоелектричного до металічного), радіуса пластини, інерційної маси дозволяють скоротити строки проектування п'єзоакселерометрів і знаходити шляхи щодо покращення існуючих конструкцій, дозволяють змінювати проектні параметри таким чином, щоб отримати необхідні значення робочого частотного діапазону давача.

1. Брех Е. Т. *Применение измерительных систем фирмы "Брюль и Кьер" для измерения механических колебаний и ударов.* – Дания: Брюль и Кьер, 1973. – 308 с. 2. Дунаевский В. П., Субботин М. И., Вуколов А. Н. и др. *Влияние механических, тепловых и электрических воздействий на показания пьезоэлектрических акселерометров / Вибрационная техника.* – М.: МДНТП им. Ф. Э. Держинского, 1976. – С. 15-27. 3. Аронов Б. С. *Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики.* – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 269 с. 4. Голубев В. С. *К оценке измерительных свойств акселерометров линейных ускорений // Виброакустические процессы в машинах и присоединенных конструкциях.* – М.: Наука, 1974. – С. 83-98.