



УКРАЇНА

(19) UA (11) 36233 (13) U

(51) МПК (2006)

G01R 29/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

## (54) СПОСІБ ОЦІНКИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОЇ КЕРАМІКИ

1

2

(21) u200800872

(22) 24.01.2008

(24) 27.10.2008

(46) 27.10.2008, Бюл.№ 20, 2008 р.

(72) ДІДКОВСЬКИЙ ВІТАЛІЙ СЕМЕНОВИЧ, UA,  
ШАБЛАТОВИЧ АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ, UA, ПЕ-  
ТРИЩЕВ ОЛЕГ МИКОЛАЙОВИЧ, UA, КЛІМОВ  
ОЛЕКСАНДР ЄВДОКИМОВИЧ, UA, ШАМАРІН  
ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ, UA(73) ДІДКОВСЬКИЙ ВІТАЛІЙ СЕМЕНОВИЧ, UA,  
ШАБЛАТОВИЧ АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ, UA, ПЕ-  
ТРИЩЕВ ОЛЕГ МИКОЛАЙОВИЧ, UA, КЛІМОВ  
ОЛЕКСАНДР ЄВДОКИМОВИЧ, UA, ШАМАРІН  
ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ, UA(57) Спосіб визначення фізико-механічних кон-  
стант п'єзокерамічних матеріалів, що включає вимі-  
ри частот електромеханічних резонансів та анти-  
резонансів у діапазонах високих, середніх та  
низьких частот, та обчислення констант п'єзокера-  
мічних матеріалів, який **відрізняється** тим, що  
виміри електромеханічних резонансів та антире-  
зонансів здійснюються у діапазонах високих та се-  
редніх частот, а із констант п'єзокерамічних мате-  
ріалів обчислюють три компоненти тензора  
модулів пружності, один компонент тензора діеле-  
ктричної проникності і усі компоненти тензора п'є-  
зомодулів, при цьому модуль пружності обчислю-  
ють за формулою:

$$C_{12}^E = \frac{C_{33}^E}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{4kC_{11}^*}{C_{33}^E}} \right],$$

де:  $C_{33}^E$  - модуль пружності, який вимірюється в  
режимі постійного напруження електричного поля, $C_{11}^*$  - наведений модуль пружності, який обчислю-  
ють за формулою:

$$C_{11}^E = C_{11}^* + \frac{(C_{12}^E)^2}{C_{33}^E},$$

діелектричну проникність обчислюють за форму-  
лою:

$$\chi_3^\varepsilon = \frac{\chi_3^\sigma}{1 + K_3^2},$$

де:  $\chi_3^\sigma$  - діелектрична проникність, яка вимірюєть-  
ся в режимі постійного механічного напруження, $K_3^2$  - квадрат коефіцієнта електромеханічного  
зв'язку,а п'єзомодуль пружності обчислюють за форму-  
лою:

$$e_{31} = - \left\{ \sqrt{\frac{C_{11}^* \chi_3^\sigma}{2} \left[ \frac{\Omega_1 J_0(\Omega_1)}{J_1(\Omega_1)} + 1 - k \right]} - \frac{C_{12}^E e_{33}}{C_{33}^E} \right\},$$

де:  $J_\nu(\Omega_1)$  ( $\nu = 0, 1$ ) - функції Бесселя порядку  $\nu$ .Корисна модель відноситься до вимірювальної  
техніки і технічної акустики і може бути використа-  
на при вхідному контролі параметрів п'єзоелектри-  
чних керамік акустичних приладів.Відомий спосіб кругових діаграм для визна-  
чення констант п'єзокерамічних матеріалів, який  
базується на математичній моделі електричного  
імпедансу досліджуваного зразка [1]. Вірогідністьрезультатів, що можна одержати за допомогою  
цього способу, визначаються ступенем адекватно-  
сті математичної моделі реального об'єкту. Суть  
способу полягає у вимірі дійсної і вірогідної частин  
електричного імпедансу п'єзокерамічного зразка.  
За результатами цих вимірів будується кругова  
діаграма комплексного опору чи провідності і по

(13) U

(11) 36233

(19) UA

характерним крапкам на діаграмі визначаються константи п'єзоелектричних матеріалів.

Недоліками цього способу є те, що для визначення констант необхідно проводити виміри на зразках різної форми і різної поляризації при цьому виникають погрішності.

Відомий спосіб резонансу - антирезонансу, відповідно до якого здійснюють вимірювання частот електромеханічних резонансів та антирезонансів сталих коливань досліджуваних зразків [2, 3].

Недоліком зазначеного способу є те, що в ньому є повна неясність у порядку визначення числових значень діелектричної проникності п'єзоелектрика.

Найбільш близьким способом того ж призначення що і спосіб, який заявляється, є спосіб у якого п'єзокерамічний матеріал використовують у вигляді дисків, а виміри частот електромеханічних резонансів та антирезонансів здійснюють на високих, середніх та низьких частотах, що відповідають режимам товщинних, планарних та вигибних коливань досліджуваних зразків, при цьому на низьких частотах виміри здійснюють на склеєних дисках, а диски використовують однакового розміру, маси, складу, технології виготовлення та статичної електричної ємності [4]. Зазначений спосіб вибраний у якості прототипа.

До причин, що перешкоджають досягненню очікуваного технічного результату при використанні відомого способу слід віднести те, що в ньому є складна процедура підготовки зразків п'єзокерамічних матеріалів і проводиться досить велика кількість вимірів.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення відомого способу.

Поставлена задача вирішується тим, що виміри електромеханічних резонансів та антирезонансів здійснюють у діапазонах високих та середніх частот, а із констант п'єзокерамічних матеріалів обчислюють три компоненти тензора модулів пружності, один компонент тензора діелектричної проникності і усі компоненти тензора п'єзомодулів, при цьому модуль пружності обчислюють по формулі:

$$C_{12}^E = \frac{C_{33}^E}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{4kC_{11}^*}{C_{33}^E}} \right]$$

де:  $C_{33}^E$  - модуль пружності, який вимірюється в режимі постійного напруження електричного поля.

$C_{11}^*$  - приведений модуль пружності.

Модуль пружності обчислюють по формулі:

$$C_{11}^E = C_{11}^* + \frac{(C_{12}^E)^2}{C_{33}^E}$$

Діелектричну проникність обчислюють по формулі:

$$\chi_3^E = \frac{\chi_3^\sigma}{1 + K_3^2}$$

де:  $\chi_3^\sigma$  - діелектрична проникність, яка вимірюється в режимі постійного механічного напруження.

$K_3^2$  - квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку.

а п'єзомодуль пружності обчислюють по формулі:

$$e_{31} = - \left\{ \sqrt{\frac{C_{11}^* \chi_3^\sigma}{2} \left[ \frac{\Omega_1 J_0(\Omega_1)}{J_1(\Omega_1)} + 1 - k \right]} - \frac{C_{12}^E e_{33}}{C_{33}^E} \right\}$$

де:  $J_\nu(\Omega_1)$  ( $\nu = 0,1$ ) - функції Бесселя порядку  $\nu$ .

Запропонований спосіб припускає використання всього лише одного зразка у вигляді диска, матеріал якого поляризований у напрямку його товщини, що не має потреби в будь-якій спеціальній підготовці, при цьому виконуються виміри всього п'яти, а не семи, як у прототипі, резонансних частот. Таким чином, процес вимірювання параметрів п'єзокерамічних матеріалів стає більш швидким, дешевим і зберігає вірогідність одержуваних результатів.

Суть запропонованої корисної моделі пояснюється кресленнями:

Фіг.1 - Електрична схема включення диска із п'єзокерамічних матеріалів для вимірювання частот електромеханічних резонансів та антирезонансів.

Фіг.2 - Вимірювання модуля електричного імпедансу коливачого диска в межах частот резонанса та антирезонанса.

Експериментальний етап визначення фізико-механічних параметрів п'єзоелектричних керамік виконується в наступному порядку.

Використовуючи схему, що показана на Фіг.1 роблять виміри частот електромеханічних резонансів та антирезонансів у діапазоні високих частот або в режимі товщинних коливань, а також в області середніх частот або в режимі планарних коливань. Діапазон високих частот - це частоти в межах  $f \pm 0,1f$ , де  $f = (1,75/2h\text{MM}) \cdot 106\text{Гц}$ , де  $2h\text{MM}$  - товщина диска в міліметрах. Діапазон середніх частот - це частоти в межах  $f_{CP} \pm 0,1 f_{CP}$ , де  $f_{CP} = (1,1/RCM) \cdot 105\text{Гц}$ , де  $RCM$  - радіус п'єзокерамічного диска в сантиметрах. Для дисків з діаметром  $2R > 50\text{мм}$  і товщиною  $2h > 2\text{мм}$  режим сталих радіальних коливань існує в діапазоні частот від 30 до 100Кгц і товщинні коливання диска існують у діапазоні частот від 0,5 до 1Мгц.

На Фіг.1. позицією 1 зазначений п'єзокерамічний диск, 2 - чутливий електронний вольтметр, 3 - перебудовуючий генератор гармонійних коливань, 4 - електронний частотомір. Опір резисторів  $R1$  та  $R2$  однакові і вибираються близько 1кОм.

В області високих частот (у режимі товщинних коливань), при підході до частот електромеханічного резонансу та антирезонансу модуль електричного імпедансу коливного п'єзокерамічного диска змінюється так, як це показано на Фіг.2.

При підході до частоти електромеханічного резонансу (символ  $\omega_p$  на Фіг.2) з області більше низьких частот, тобто ліворуч по осі частот, модуль електричного імпедансу коливного п'єзокерамічного диска різко зменшується, досягаючи абсолютного мінімуму на частоті  $\omega_p$ . При положенні ключів K1...K4, що показано на Фіг.1, показання вольметра 2 на частоті  $\omega_p$  будуть мінімальними. Використовуючи шкалу вольметра 2 з максимальною чутливістю, можна досить точно визначити те значення частоти, при якому спостерігається абсолютний мінімум показань. Це значення частоти буде відповідати частоті першого електромеханічного резонансу. Після виміру значення частоти резонансу ключі K1...K4 перемикаються, тобто ключі K1, K4 замикаються, а ключі K2, K3 - розмикаються. При підході до частоти електромеханічного антирезонансу модуль електричного імпедансу коливного диска досягає максимальних значень і, отже, на резисторі R2 вольтметром 2 фіксується мінімальне спадання напруги. Частота, на якій спостерігається абсолютний мінімум показань вольметра 2, відповідає частоті першого електромеханічного резонансу. Значення частот резонансу і антирезонансу точно фіксуються електронним частотоміром 4.

Частоти перших електромеханічних резонансів та антирезонансів у режимах планарних коливань визначаються аналогічним описаному вище способом.

Методика обробки результатів вимірів частот електромеханічних резонансів та антирезонансів здійснюється у двох частотних діапазонах.

Для виконання розрахунків вхідними величинами є:

- геометричні параметри зразка:  $2h$  - товщина і  $R$  - радіус диска (метри);

- механічні параметри: маса зразка:  $m$  - кілограми;  $\rho_0 = m/(2\pi h^2)$  - щільність п'єзокераміки ( $\text{кг/м}^3$ );

- електричні параметри: статична ємність

$C_0^\sigma = \pi \chi_3^\sigma R^2 / 2h$  електродірованого диску, що вимірюється на частоті 50 Гц і через яку визначається компонент тензора діелектричної проникності п'єзокераміки в режимі сталості механічних на-

пруг  $\chi_3^\sigma = 2h C_0^\sigma / (\pi R^2)$  (фарада/метр);

- частоти перших електромеханічних резонансів та антирезонансів:

$f_p$  і  $f_a$  - частоти першого електромеханічного резонансу та антирезонансу в режимі товщинних коливань (вимірюються в області високих частот у герцах);

$f_p^{(1)}$  і  $f_p^{(2)}$

- частоти першого і другого електро-механічних резонансів у режимі планарних (радіальних) коливань (вимірюються в області середніх частот у герцах);

$f_a^{(1)}$

- частота першого антирезонансу в режимі планарних (радіальних) коливань (вимірюється в області середніх частот у герцах);

- модуль електричного імпедансу  $Z(\omega_p)$  на частоті першого електромеханічного резонансу в режимі товщинних коливань (Ом).

Обробка результатів вимірів частот резонансів та антирезонансів відбувається в наступному порядку.

Визначається безрозмірний допоміжний параметр

$$\zeta_z = \pi f_p / (2f_a)$$

За числовим значенням частоти першого електромеханічного антирезонансу  $f_a$  визначається модуль пружності

$$C_{33}^D = 16f_a^2 h^2 \rho_0$$

(у паскалях або ньютонах ділених на метр квадратний).

По параметру  $\zeta_z$  визначається квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку в режимі квазістатичного стиснення-розтягування

$$K_3^2 = \frac{\zeta_z}{\text{tg}(\zeta_z) - \zeta_z}$$

Тому що  $C_{33}^D = C_{33}^E (1 + K_3^2)$ , то по знайдених

величинах  $C_{33}^D$  і  $K_3^2$  визначається модуль пружності п'єзокераміки в режимі сталості напруженості електричного поля, тобто величина

$$C_{33}^E = \frac{C_{33}^D}{1 + K_3^2}$$

(вимірюється у паскалях або в ньютонах ділених на квадратний метр).

За відомим значенням величин  $\chi_3^\sigma$  і  $K_3^2$  визначається діелектрична проникність у режимі сталості деформацій

$$\chi_3^\varepsilon = \frac{\chi_3^\sigma}{1 + K_3^2}$$

(вимірюється у фарадах ділених на метр).

За відомим значенням величин  $\chi_3^\varepsilon$ ,  $K_3^2$  і  $C_{33}^E$  визначається п'єзомодуль

$$e_{33} = \sqrt{K_3^2 \chi_3^\varepsilon C_{33}^E}$$

(вимірюється в кулонах ділених на квадратний метр).

За визначеним значенням  $f_p$  та  $Z(\omega_p)$  і відомим значенням  $\chi_3^\sigma$ ,  $K_3^2$ ,  $\rho_0$  і  $C_{33}^D$  виконується оцінка мінімальної добротності п'єзокераміки (безрозмірна величина)

$$Q = \frac{2h^2 \left[ K_3^2 - (1 + K_3^2) \cos \zeta_z \right]}{\pi R^2 \chi_3^\sigma Z(\omega_p) \cos \zeta_z \sqrt{C_{33}^D / \rho_0}}$$

Визначається допоміжний параметр

$$\xi = \frac{f_p^{(2)}}{f_p^{(1)}}.$$

По параметру (він завжди більше одиниці) за допомогою таблиці 1 знаходять відповідні цьому параметру допоміжні величини  $k$  та  $q$ .

Таблиця 1

K	q	$\xi$
0,20	1,984414	2,706166
0,21	1,991055	2,698107
0,22	1,997651	2,690162
0,23	2,004202	2,682328
0,24	2,010709	2,674604
0,25	2,017172	2,666987
0,26	2,023592	2,659475
0,27	2,029969	2,652066
0,28	2,036305	2,644756
0,29	2,042598	2,637546
0,30	2,048850	2,630434
0,31	2,055062	2,623414
0,32	2,061233	2,616488
0,33	2,067364	2,609654
0,34	2,073455	2,602910
0,35	2,079508	2,596252
0,36	2,085521	2,589682
0,37	2,091497	2,583195
0,38	2,097435	2,576790
0,39	2,103335	2,570468
0,40	2,109198	2,564226
0,41	2,115025	2,558061
0,42	2,120115	2,552817
0,43	2,126569	2,545963
0,44	2,132287	2,540026
0,45	2,137971	2,534161
0,46	2,143619	2,528369
0,47	2,149233	2,522646
0,48	2,154813	2,516992
0,49	2,160359	2,511407
0,50	2,165871	2,505889
0,51	2,171351	2,500435
0,52	2,176797	2,495047
0,53	2,182211	2,489722
0,54	2,187592	2,484460
0,55	2,192942	2,479258
0,56	2,198260	2,474116
0,57	2,203546	2,469035
0,58	2,208802	2,464011
0,59	2,214026	2,459046
0,60	2,219221	2,454135

Визначається числове значення наведеного модуля пружності

$$C_{11}^* = \rho_0 \left[ 2\pi f_p^{(1)} R / q \right]^2.$$

(визначається у паскалях або ньютонів ділених на метр квадратний).

По параметру  $k$  і наведеному модулю пружності  $C_{11}^*$  визначається наведений модуль пружності

$$C_{12}^*:$$

$$C_{12}^* = k C_{11}^*,$$

(визначається у паскалях або ньютонів ділених на метр квадратний).

По відомих величинах  $C_{33}^E$ ,  $C_{11}^*$  і  $k$  розраховується модуль пружності

$$C_{12}^E = \frac{C_{33}^E}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{4kC_{11}^*}{C_{33}^E}} \right].$$

(визначається у паскалях або ньютонів ділених на метр квадратний).

По відомих величинах  $C_{33}^E$ ,  $C_{11}^*$  і  $C_{12}^E$  розраховується модуль пружності

$$C_{11}^E = C_{11}^* + \frac{(C_{12}^E)^2}{C_{33}^E}$$

(визначається у паскалях або ньютонів ділених на метр квадратний).

По відомих величинах  $C_{11}^E$  і  $C_{12}^E$  розраховується модуль пружності

$$C_{66}^E = (C_{11}^E - C_{12}^E) / 2.$$

(визначається у паскалях або ньютонів ділених на метр квадратний).

По відомих величинах  $C_{12}^E$  і  $C_{66}^E$  виконується оцінка величини модулів пружності

$$C_{13}^E \cong C_{12}^E, C_{44}^E \cong C_{66}^E.$$

Визначається безрозмірний допоміжний параметр

$$\Omega_1 = \frac{q f_a^{(1)}}{f_p^{(1)}}.$$

Розраховується значення п'єзомодуля

$$e_{31} = - \left\{ \sqrt{\frac{C_{11}^* \chi_3^2}{2} \left[ \frac{\Omega_1 J_0(\Omega_1)}{J_1(\Omega_1)} + 1 - k \right]} - \frac{C_{12}^E e_{33}}{C_{33}^E} \right\}$$

де  $J_v(\Omega_1)$  ( $v = 0,1$ ) - функції Бесселя порядку  $v$ . (розмірність п'єзомодуля  $e_{31}$  - кулони ділені на метр квадратний).

За відомих значенням  $e_{33}$  і  $e_{31}$  визначається п'єзомодуль

$$e_{15} = \frac{e_{33} - e_{31}}{2}.$$

Запропонована методика обробки результатів виміру частот електромеханічних резонансів та антирезонансів дозволяє розрахунковим шляхом за обмірюваним значенням частот резонансів та антирезонансів у двох частотних діапазонах поля-

ризованого по товщині диска визначити практично повний набір матеріальних констант п'єзокерамічного матеріалу. Це точно обумовлені три компоненти тензора модулів пружності (два інших модулі оцінюються з достатньою для виконання практичних обчислень точністю), один компонент тензора діелектричної проникності та усіх компонентів тензора п'єзомодулів. Визначених за допомогою запропонованого способу фізико-механічних параметрів п'єзоелектричної кераміки цілком достатньо для коректного розрахунку та проектування основних типів п'єзоелектричних електроакустичних пере-

творювачів і п'єзоелектронних пристроїв, систем контролю та керування.

В таблиці 2 представлені результати практичного використання способу, що заявляється, які свідчать про те, що модулі пружності, які визначені по існуючим способам і модулі пружності, які визначені відповідно до способу, що заявляється, майже не відрізняються одні від одних. Суттєві розбіжності між значеннями п'єзомодулів та діелектричної проникності обумовлені процесами старіння п'єзоелектричних матеріалів.

Таблиця 2

Вхідні величини		Вихідні величини		Довідкові дані з кераміки ЦТС-19 <sup>(*)</sup>
параметр	значення	параметр	значення	
Матеріал	Припустимо кераміка ЦТС-19	Плотність $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	7405	7400
Радіус диска R, м	0,033	Модуль пружності $C_{33}^E$ , ГПа	103,6	106
Товщина диску 2h, м	0,003	Модуль пружності $C_{11}^E$ , ГПа	118,7	112,2
Статична ємність $C_0^\sigma$ , Ф	$5,447 \cdot 10^{-9}$	Модуль пружності $C_{12}^E$ , ГПа	68,2	62,2
Частота $f_p$ , Гц	641214	Модуль пружності $C_{66}^E$ , ГПа	25,3	24,9 <sup>(**)</sup>
Частота $f_a$ , Гц	741599	П'єзомодуль $e_{33}$ , Кл/м <sup>2</sup>	12,05	15,1
Модуль $Z(\omega_p)$ , Ом	1,985	П'єзомодуль $e_{31}$ , Кл/м <sup>2</sup>	-2,89	-3,4
Частота $f_p^{(1)}$ , Гц	31350	П'єзомодуль $e_{15}$ , Кл/м <sup>2</sup>	7,47	9,45
Частота $f_p^{(2)}$ , Гц	82117	Діел. проникність $\chi_3^\sigma$ , Ф/м	$4,776 \cdot 10^{-9}$	$8,274 \cdot 10^{-9}$
Частота $f_a^{(1)}$ , Гц	36747	Добротність Q	81	70 <sup>(***)</sup>

Джерела інформації.

1. Шульга Н.А., Болкисев А.М. Колебания пьезоэлектрических тел. -Киев: "Наукова думка", 1990.

2. Авторське свідоцтво СРСР №1648175, кл. G01R29/22, G03R3/02, 1989.

3. Авторське свідоцтво СРСР №1800406A1, кл. G01R29/22, 1993.

4. Патент України №6210, бюл. №4, 15.04.05.

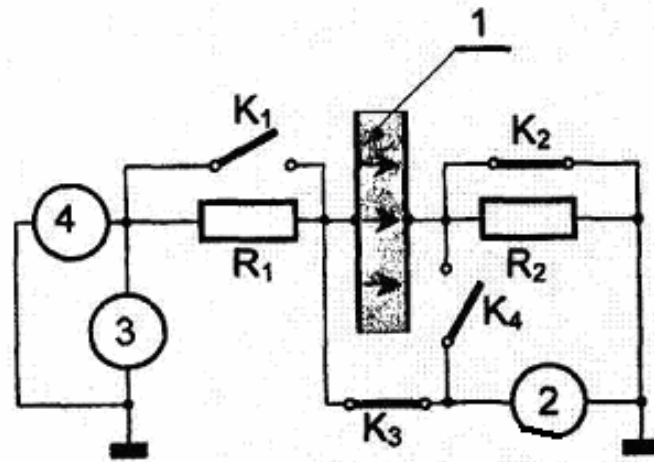


Fig. 1

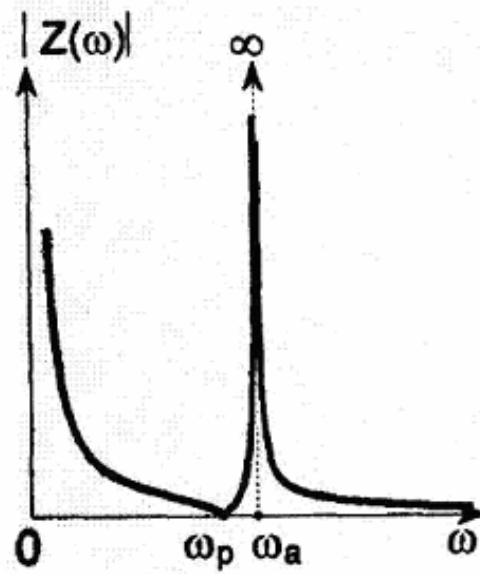


Fig. 2