



УКРАЇНА

(19) UA (11) 6210 (13) U
(51) 7 G01R29/22МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ КОНСТАНТ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

1

2

(21) 20041109024

(22) 04 11 2004

(24) 15 04 2005

(46) 15 04 2005, Бюл. №4, 2005р

(72) Дідковський Віталій Семенович, Петрищев Олег Миколайович, Шаблатович Андрій Миколайович

(73) Дідковський Віталій Семенович, Петрищев Олег Миколайович, Шаблатович Андрій Миколайович

(57) 1 Спосіб визначення фізико-механічних констант п'єзокерамічних матеріалів, що включає подачу на матеріал напруги змінної частоти, вимірювання частот електромеханічних резонансів та антирезонансів, обчислення констант п'єзокерамічних матеріалів, який відрізняється тим, що п'єзокерамічний матеріал використовують у вигляді диска, а вимірювання частот електромеханічних резонансів та антирезонансів здійснюють на високих, середніх та низьких частотах, причому на низьких частотах вимірювання здійснюють на склеєних дисках, а із констант п'єзокерамічних матеріалів визначають модулі пружності, діелектричну проникність та п'єзомодулі

2 Спосіб за п 1, який відрізняється тим, що диски використовують однакового розміру, маси, складу, технології виготовлення та статичної електричної ємності, яка вимірюється на частоті 50 Гц

3 Спосіб за п 1, який відрізняється тим, що в склеєних дисках електрична поляризація не змінює своєї орієнтації при переході через поверхню поклеювання, а в електричну схему диски включають зустрічно

4 Спосіб за п 1, який відрізняється тим, що вимірювання здійснюють на високих частотах - $f = (1,75/\gamma_{\text{мм}}) 10^6$ Гц, де $\gamma_{\text{мм}}$ - товщина диска в міліметрах, на середніх частотах - $f_{\text{CP}} = (1,1/R_{\text{см}}) 10^5$ Гц, де $R_{\text{см}}$ - радіус п'єзокерамічного диска в сантиметрах, та на низьких частотах - $f_{\text{HЧ}} = 2,9 (\gamma_{\text{мм}}/R_{\text{см}}^2) 10^4$ Гц

5 Спосіб за п 1, який відрізняється тим, що модулі пружності п'єзокераміки розраховують за формулами

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

де C_{33}^D - модуль пружності, Па, K_3^2 - квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку,

$$C_{11}^E = \frac{48\pi^2 \rho_0 R^4 (f_{\text{РБ}}^{(1)})^2}{\alpha^2 (1 + K_{31}^2) y_1^4}, \text{ Па,}$$

де ρ_0 - щільність, кг/м³

R - радіус диска, м

 α , м - товщина диска, м y_1^4 - четверта ступінь першого кореня частотного рівняння коливань вигину (безрозмірне хвильове число), $f_{\text{РБ}}^{(1)}$ - частота першого електромеханічного резонансу, Гц, K_{31}^2 - квадрат статичного коефіцієнта електромеханічного зв'язку,

$$C_{31}^E = \sqrt{(C_{11}^E - C_{11}^*) C_{33}^E}, \text{ Па,}$$

$$C_{12}^E = C_{12}^* - C_{11}^* + C_{11}^E, \text{ Па,}$$

де C_{11}^* , C_{12}^* - приведені модулі пружності, Па

6 Спосіб за п 1, який відрізняється тим, що визначають діелектричну проникність за формулою

$$\chi_3^E = \chi_3^D / \wedge_0, \text{ Ф/м,}$$

де χ_3^E - діелектрична проникність в режимі сталості механічних напруг, \wedge_0 - допоміжний параметр(13) U
(11) 6210
(19) UA

7. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що визначають п'єзомодулі за формулами

$$e_{33} = K_3 \sqrt{\chi_3^E E_{33}}, \text{ Кл/м}^2,$$

де K_3 - коефіцієнт електро механічного зв'язку,

$$e_{31} = \beta_e e_{33}, \text{ Кл/м}^2$$

де β_e - допоміжний параметр,

$$e_{15} = (e_{33} - e_{31})/2$$

Запропонована корисна модель відноситься до вимірювальної техніки і технічної акустики і може бути використана при перевірці та тарировці п'єзокерамічних матеріалів у процесі їх виробництва та використання.

Відомий спосіб ультразвукового визначення констант п'єзокерамічних матеріалів, який включає вимірювання швидкостей, розповсюдження ультразвукових хвиль в повздовжньому та поперечному напрямках до остаточної поляризації п'єзокерамічних зразків [1].

Недоліками цього способу є складність підготовки зразків до вимірювання і складність забезпечення плоских хвиль, які повинні поширюватися в строго визначених напрямках відносно кристалографічних осей і при цьому мати наперед задану поляризацію. Крім цього, обробка результатів вимірювання швидкостей поширення плоских хвиль неможлива без знання числових значень компонентів тензора діелектричної проникності в режимі постійності деформацій п'єзоелектрика. У різних версіях ультразвукового способу ці величини передбачаються заздалегідь відомими. Тому що в цьому способі діелектричні проникності не вимірюються по визначенню, тому він не може розглядатися як самостійний і замкнутий спосіб для визначення фізико-механічних констант п'єзокерамічних матеріалів.

Відомий також спосіб кругових діаграм для визначення зазначених констант, який базується на математичній моделі електричного імпедансу досліджуваного зразка [2, 3]. Вірогідність результатів, що можна одержати за допомогою цього способу, визначаються ступенем адекватності математичної моделі реальному об'єкту. Суть способу полягає у вимірюванні дійсної і уявної частини електричного імпедансу п'єзокерамічного зразка на великій кількості різних значень частот. За результатами цих вимірювань будується кругова діаграма комплексного опору чи провідності і по характеристичним крапкам на діаграмі визначаються константи п'єзоелектричних матеріалів. Спосіб кругових діаграм вимагає дорогої апаратури і великого обсягу вимірювань. До причин, що перешкоджають досягненню очікуваного технічного результату при використанні відомого способу відноситься те, що для визначення констант п'єзокераміки необхідно проводити вимірювання на зразках різної форми і різної поляризації. При цьому виникають погрешності. Це означає, що п'єзоелектричні константи і діелектричні проникності різних за формою зразків, виготовлених з однакової вихідної сировини, можуть відрізнятися один від одного. Якщо, до

того ж різні за формою зразки поляризовані в різних напрямках, то числові значення п'єзомодулів цих зразків будуть обов'язково відрізнятися. Ці погрешності практично не піддаються оцінюванню і питання про достовірність обмірюваних числових значень констант залишається без відповіді.

Найбільш близьким способом такого ж призначення до заявленого є спосіб резонансу - антирезонансу, відповідно до якого здійснюється вимірювання частот електро механічних резонансів та антирезонансів сталих коливань досліджуваних зразків [4, 5]. Як і в способі кругових діаграм, теоретичною основою є математична модель електричного імпедансу досліджуваного зразка. З цієї причини всі погрешності способу кругових діаграм мають місце і у відомому способі резонансу - антирезонансу. Спосіб резонансу-антирезонансу вирає в порівнянні зі способом кругових діаграм так як він не вимагає застосування дорогої апаратури і значної кількості складних вимірювань.

До причин, що перешкоджають досягненню очікуваного технічного результату при використанні відомого способу слід віднести те, що є повна неясність у порядку визначення числових значень діелектричної проникності в режимі постійності деформацій п'єзоелектрика.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення способу резонансу-антирезонансу вимірювання фізико-механічних параметрів п'єзокерамічних матеріалів, шляхом забезпечення замкнутого циклу вимірювання основних параметрів.

Поставлена задача вирішується тим, що п'єзокерамічний матеріал використовують у вигляді дисків, а вимірювання частот електро механічних 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 вимірювання здійснюють на склеєних дисках, а диски використовують однакового розміру, маси, складу, технології виготовлення та статичної електричної ємності, яка вимірюється на частоті 50 Гц. В склеєних дисках електрична поляризація не змінює своєї орієнтації при переході через поверхню поклейки, а в електричну схему диски включають зустрічне, при цьому вимірювання здійснюють на низьких частотах - $f_{нч} = 2,9 (\alpha_{мм}/R_{см}^2) 10^4$ Гц. Для одиночного диска вимірювання здійснюють на високих частотах - $f = (1,75/\alpha_{мм}) 10^5$ Гц, де $\alpha_{мм}$ - товщина диска в міліметрах, середніх частотах - $f_{ср} = (1,1/R_{см}) 10^5$ Гц, де $r_{см}$ - радіус п'єзокерамічного диска в сантиметрах.

Модулі пружності п'єзокераміки розраховують по формулам:

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

$$C_{11}^E = \frac{48\pi^2 \rho_0 R^4 (t_{PE}^{(1)})^2}{\alpha^2 (1 + K_{31}^2) Y_1^4};$$

$$C_{31}^E = \sqrt{(C_{11}^E - C_{11}^* C_{33}^E); C_{12}^E = C_{12}^* - C_{11}^* + C_{11}^E}.$$

визначають діелектричну проникність по формулі:

$$\chi_3^E = \chi_3^D / \Lambda_0$$

а також визначають п'єзомодулі по формулам:

$$e_{33} = K_3 \sqrt{\chi_3^E C_{33}^E}; e_{31} = \beta_e e_{33}; e_{15} = (e_{33} - e_{31}) / 2$$

Виходячи із зазначеного, саме поєднання відомих наведених ознак і сукупність суттєвих ознак способу, що заявляється, забезпечують виявлення нових технічних властивостей корисної моделі, які пов'язані із забезпеченням замкнутого циклу вимірювання основних фізико-механічних параметрів п'єзокерамічних матеріалів, зокрема чотирьох компонент тензора модулів пружності, одного компонента тензора діелектричної проникності і трьох компонент тензора п'єзомодулів, крім цього виключені погрешності, які обумовлені розходженням технологій виготовлення досліджуваних зразків.

Визначення фізико-механічних констант п'єзокерамічних матеріалів згідно запропонованого способу здійснюється шляхом відбору трьох однакових по розміру і поляризованих по товщині п'єзокерамічних дисків (товщина α і радіус R), масі m (отже, однакової щільності $\rho_0 = m / (\pi \alpha R^2)$) з статичною електричною ємністю C_0^D , що вимірюється на частоті 50 Гц, зразка. Однакова для всіх дисків величина C_0^D відповідає однаковій для всіх дисків діелектричній проникності п'єзокераміки $\chi_3^E = \alpha C_0^D / (\pi R^2)$ обмірюваної в режимі постійності механічних напруг σ . Розміри дисків вибирають максимально великими, щоб звести до мінімуму вплив приєднаних мас, що виникають при пайці провідників електричного струму, на параметри і характеристики деформованого стану дисків і мінімізувати верхню граничну частоту частотного діапазону, у якому слід вимірювати частоти електромеханічних резонансів та антирезонансів дисків, які коливаються. Чим менше ця гранична частота, тим менший вплив на результати вимірювань роблять паразитні реактивності електричної схеми, у яку включаються п'єзокерамічні диски.

Два диски склеюють між собою так, що напрямок електричної поляризації матеріалу дисків не змінює своєї орієнтації при переході через поверхню поклейки. Напрямок електричної поляризації матеріалу дисків (позиції 1 на Фіг.1 і Фіг.2) показані стрілками. На Фіг.1 зображено включення в електричну схему одного п'єзокерамічного диска. На Фіг.2 зображено включення в електричну схему двох склеєних дисків, що утворюють біморфний п'єзоелектричний елемент.

З використанням схеми на Фіг.1, роблять вимірювання частот електромеханічних резонансів та антирезонансів у діапазоні високих частот чи у режимі товщинних коливань і в області середніх частот чи у режимі планарних коливань. Діапазон високих частот - це найближча околиця частоти $f = (1,75 / \alpha_{\text{мм}}) \cdot 10^6$ Гц, де $\alpha_{\text{мм}}$ - товщина диска в міліметрах. Діапазон середніх частот - це околиця частоти $f_{\text{ор}} = (1,1 / R_{\text{см}}) \cdot 10^5$ Гц, де $R_{\text{см}}$ - радіус п'єзокерамічного диска в сантиметрах. По схемі, показаній на Фіг.2, роблять вимірювання частот першого електромеханічного резонансу та антирезонансу в режимі сталих коливань поперечного вигину в області низьких частот. Область низьких частот для біморфного п'єзоелектричного елемента розташовується на околиці частоти $f_{\text{нч}} = 2,9 (\alpha_{\text{мм}} / R_{\text{см}}^2) \cdot 10^4$ Гц. Для дисків з діаметром $2R > 50$ мм і товщиною $\alpha > 2$ мм напружено - деформований стан вигину існує в діапазоні частот 5...30 Гц, режим сталих радіальних коливань існує в діапазоні частот від 30 до 100 Гц а товщинні коливання диска існують у діапазоні частот від 0,5 до 1 МГц.

На Фіг.1 і Фіг.2 позицією 2 відзначений чуттєвий електронний вольтметр, 3 - генератор гармонічних коливань, значення частоти вихідного сигналу якого регулюється, 4 - електронний частотомір. Резистори R_1 і R_2 однакові і вибираються опором 100 Ом.

На Фіг.3 зображено коливання диска та зміна модуля електричного імпедансу в області високих частот (у режимі товщинних коливань), при підході до частот електромеханічного резонансу та антирезонансу.

При підході до частоти електромеханічного резонансу (символ ω_r на Фіг.3) з області більш низьких частот, тобто ліворуч по осі частот, модуль електричного імпедансу п'єзокерамічного диска, який коливається, різко зменшується, досягаючи абсолютного мінімуму на частоті ω_r . При такому положенні ключів $K_1 \dots K_4$, яке показано на Фіг.1, показання вольтметра 2 на частоті ω_r будуть мінімальними. Використовуючи шкалу вольтметра з максимальною чутливістю, можна досить точно визначити те значення частоти, при якій спостерігається абсолютний мінімум показань вольтметра 2. Це значення частоти буде відповідати частоті першого електромеханічного резонансу. Після вимірювання значення частоти резонансу ключі $K_1 \dots K_4$ переключуються, тобто ключі K_1 , K_4 замикаються, а ключі K_2 , K_3 - розмикаються. При підході до частоти електромеханічного антирезонансу модуль електричного імпедансу диска, який коливається, досягає максимальних значень і, отже, на резисторі R_2 вольтметром 2 фіксується мінімальне спадання електричної напруги. Частота більша ніж ω_r на якій спостерігається абсолютний мінімум показань вольтметра 2, відповідає частоті першого електромеханічного антирезонансу. Значення частот резонансу та антирезонансу точно фіксуються електронним частотоміром 4.

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

Обробка результатів вимірювань частот електромеханічних резонансів та антирезонансів у трьох частотних діапазонах здійснюється за такою методикою.

Вхідними величинами є:

- геометричні параметри зразка: α - товщина і R - радіус диска (метри);
- механічні параметри: $\rho_0 = m/(\pi\alpha R^2)$ - щільність п'єзокераміки (кг/м³);
- електричні параметри: статична ємність

$C_0^s = \pi\chi_3^s R^2 / \alpha$ диска (фаради), що вимірюється на частоті 50 Гц і через який визначається компонент тензора діелектричної проникності п'єзокераміки в режимі сталості механічних деформацій $\chi_3^s = \alpha C_0^s / (\pi R^2)$ (фарада/метр);

- частоти перших електромеханічних резонансів та антирезонансів:

f_p і f_a - частота 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 електромеханічного резонансу в режимі планарних (радіальних) коливань (вимірюються в області середніх частот у герцах);

$f_{PB}^{(1)}$, $f_{PB}^{(2)}$, $f_{AB}^{(1)}$ - частоти першого і другого електромеханічних резонансів і частота першого антирезонансу в режимі поперечних вигибних коливань (вимірюються в області низьких 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.

1. Визначається відношення частот f_p і f_a :

$$\zeta_z^{(1)} = f_p / f_a$$

2. За числовим значенням частоти першого електромеханічного антирезонансу f_a визначається модуль пружності

$$C_{33}^D = 4f_a^2 \alpha^2 \rho_0;$$

у паскалях чи ньютонів на метр квадратний.

3. По параметру $\zeta_z^{(1)}$ визначається квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку в режимі квазістатичного стиску-розтягання

$$K_3^2 = \frac{\pi \zeta_z^{(1)}}{2 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \zeta_z^{(1)}}{2} \right) - 2\pi \zeta_z^{(1)}} \quad (1)$$

4. Так як $C_{33}^D = C_{33}^E (1 + K_3^2)$, то по знайдених величинах C_{33}^D і K_3^2 визначається модуль пружності п'єзокераміки в режимі постійності напруженості електричного поля, тобто величина

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

5. Визначається параметр β_z

$$\beta_z = \frac{\theta_{33}^2}{\chi_3^s} = \frac{2\pi f_a \alpha^2 \rho_0}{2 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \zeta_z^{(1)}}{2} \right)} \quad (2)$$

6. За обмірюваним значенням f_p , C_0^s , $Z(\omega_p)$ і знайденому по формулі (1) значенню K_3^2 з виконується оцінка мінімальної добротності п'єзокераміки

$$Q = \frac{1 + K_3^2}{4\pi f_p C_0^s Z(\omega_p)} (Z_0 - 1)$$

$$\text{де } Z_0 = \frac{K_3^2}{(1 + K_3^2) \cos^2(\pi \zeta_z^{(1)} / 2)}.$$

7. Визначається параметр r_{21} - відношення частот другого та першого електромеханічного резонансу в режимі планарних (радіальних) коливань

$$r_{21} = \frac{f_p^{(2)}}{f_p^{(1)}}$$

8. По параметру r_{21} (він завжди більше одиниці) за допомогою Таблиці 1 визначаються перші два корені частотного рівняння радіальних коливань поляризованого по товщині п'єзокерамічного диска, тобто величини x_1 і x_2 . Одночасно з цим з Таблиці 1 визначається параметр k .

9. Визначається числове значення приведенного модуля пружності

$$c_{11}^* = \rho_0 \left[2\pi f_p^{(1)} R / x_1 \right]^2.$$

10. По параметру k і приведенному модулю пружності c_{11}^* визначається приведений модуль пружності c_{12}^* :

$$c_{12}^* = k c_{11}^* = k \rho_0 \left[2\pi f_p^{(1)} R / x_1 \right]^2.$$

11. За числовим значенням другого кореня частотного рівняння радіальних коливань диска визначається допоміжний параметр

Таблиця 1

k	x_1	x_2	$r_{21} = x_2 / x_1$
1	2	3	4
0,20	1,984414	5,370155	2,706166
0,21	1,991055	5,372080	2,698107
0,22	1,997651	5,374005	2,690162
0,23	2,004202	5,375929	2,682328
0,24	2,010709	5,377851	2,674604
0,25	2,017172	5,379773	2,666987
0,26	2,023592	5,381693	2,659475
0,27	2,029969	5,383613	2,652066

Продовження табл 1

1	2	3	4
0,28	2,036305	5,385531	2,644756
0,29	2,042598	5,387448	2,637546
0,30	2,048850	5,389365	2,630434
0,31	2,055062	5,391279	2,623414
0,32	2,061233	5,393193	2,616488
0,33	2,067364	5,395106	2,609654
0,34	2,073455	5,397017	2,602910
0,35	2,079508	5,398928	2,596252
0,36	2,085521	5,400837	2,589682
0,37	2,091497	5,402745	2,583195
0,38	2,097435	5,404651	2,576790
0,39	2,103335	5,406557	2,570468
0,40	2,109198	5,408461	2,564226
0,41	2,115025	5,410364	2,558061
0,42	2,120115	5,412266	2,552817
0,43	2,126569	5,414166	2,545963
0,44	2,132287	5,416066	2,540026
0,45	2,137971	5,417964	2,534161
0,46	2,143619	5,419860	2,528369
0,47	2,149233	5,421755	2,522646
0,48	2,154813	5,423649	2,516992
0,49	2,160359	5,425542	2,511407
0,50	2,165871	5,427433	2,505889
0,51	2,171351	5,429323	2,500435
0,52	2,176797	5,431212	2,495047
0,53	2,182211	5,433099	2,489722
0,54	2,187592	5,434985	2,484460
0,55	2,192942	5,436869	2,479258
0,56	2,198260	5,438752	2,474116
0,57	2,203546	5,440634	2,469035
0,58	2,208802	5,442514	2,464011
0,59	2,214026	5,444393	2,459046
0,60	2,219221	5,446270	2,454135

$$\zeta = -\frac{1}{2} \left[\frac{x_2}{J_1(x_2)} J_0(x_2) + k - 1 \right],$$

де $J_n(x_2)$ ($n=0,1$) - функції Бесселя

12 По визначеному за формулою (2) допоміжному параметру β_z визначається допоміжний параметр

$$\beta_e^* = \frac{e_{31}^*}{e_{33}} = \frac{e_{31}}{e_{33}} - \frac{c_{31}^E}{c_{33}^E} = -\sqrt{\frac{\zeta}{\beta_z}} c_{11}^* (1 + K_3^2) \quad (3)$$

13 По обмірюваних частотах першого і другого електромеханічного резонансу в режимі коливань поперечного вигину визначається допоміжний параметр x_{21}

$$x_{21} = \sqrt{\frac{\zeta(1)}{\beta_z}}$$

де $\frac{\zeta(1)}{\beta_z} = f_{PB}^{(2)} / f_{PB}^{(1)}$ завжди більше одиниці

14 По знайденому допоміжному параметру x_{21} за допомогою Таблиці 2 визначаються перші два корені y_1 і y_2 (безрозмірні хвильові числа поперечних коливань на частотах перших двох електромеханічних резонансів) частотного рівняння поперечних коливань вільно закріпленого п'єзо-

електричного біморфного елемента і допоміжний параметр ξ_0

15 По обмірюваних частотах першого електромеханічного резонансу $f_{PB}^{(1)}$ та антирезонансу

$f_{AB}^{(1)}$ і по знайденому з Таблиці 2 безрозмірному хвильовому числу y_1 визначається безрозмірне хвильове число y_1^a на частоті першого електро-

механічного резонансу

$$y_1^a = y_1 \sqrt{f_{AB}^{(1)} / f_{PB}^{(1)}}$$

16 По знайденому безрозмірному хвильовому числу y_1^a і допоміжному параметру ξ_0 визначається квадрат статичного коефіцієнта електромеханічного зв'язку (величина $K_{31}^2 = \frac{4\Xi(y_1^a)}{12 - \Xi(y_1^a)}$) при зсуві

де

$$\Xi(y_1^a) = \left[2\xi_0 - y_1^a \frac{J_0(y_1^a)}{J_1(y_1^a)} - y_1^a \frac{I_0(y_1^a)}{I_1(y_1^a)} \right] \cdot J_\nu(y_1^a) \cdot I_\nu(y_1^a),$$

- функції Бесселя і модифіковані функції Бесселя порядку $\nu = 0,1$

17 По знайдених числових значеннях квадрата статичного коефіцієнта електромеханічного зв'язку при зсуві K_{31}^2 і безрозмірному хвильовому числу

Таблиця 2

ξ_0	y_1	y_2	(X_{21})
0,400	3,097879	6,249127	2,0172276
0,405	3,096451	6,248357	2,0179092
0,410	3,095016	6,247585	2,0185954
0,415	3,093576	6,246812	2,0192851
0,420	3,092130	6,246037	2,0199788
0,425	3,090679	6,245261	2,020676
0,430	3,089221	6,244484	2,0213782
0,435	3,087757	6,243705	2,0220843
0,440	3,086288	6,242924	2,0227937
0,445	3,084812	6,242143	2,0235084
0,450	3,083330	6,241359	2,024227
0,455	3,081843	6,240575	2,024949
0,460	3,080349	6,239788	2,0256757
0,465	3,078848	6,238990	2,0264076
0,470	3,077342	6,238212	2,0271429
0,475	3,075829	6,237421	2,0278829
0,480	3,074310	6,236629	2,0286272
0,485	3,072785	6,235835	2,0293756
0,490	3,071253	6,235040	2,0301291
0,495	3,069715	6,234244	2,0308869
0,500	3,068170	6,233446	2,0316495
0,505	3,066619	6,232646	2,0324162
0,510	3,065062	6,231845	2,0331873
0,515	3,063497	6,231041	2,0339635
0,520	3,061926	6,230239	2,0347451

Продовження табл. 2

ξ_0	Y_1	Y_2	(X_{21})
0,525	3,060349	6,229433	2,035530
0,530	3,058764	6,228626	2,0363212
0,535	3,057173	6,227817	2,0371163
0,540	3,055575	6,227007	2,0379166
0,545	3,053970	6,226196	2,0387221
0,550	3,052358	6,225383	2,0395324
0,555	3,050739	6,224568	2,0403476
0,560	3,049113	6,223752	2,041168
0,565	3,047480	6,222934	2,0419934
0,570	3,045840	6,222115	2,042824
0,575	3,044193	6,221294	2,043660
0,580	3,042538	6,220471	2,0445007
0,585	3,040876	6,219647	2,0453471
0,590	3,039207	6,218822	2,0461989
0,595	3,037531	6,217995	2,0470557
0,600	3,035847	6,217166	2,047918

поперечних коливань на частоті першого електромеханічного резонансу Y_1 і по обмірюваній частоті першого електромеханічного резонансу $f_{PB}^{(1)}$

визначається модуль пружності c_{11}^E .

$$c_{11}^E = \frac{48\pi^2 \rho_0 R^4 (f_{PB}^{(1)})^2}{\alpha^2 (1 + K_{31}^2) Y_1^4};$$

18. За знайденим значенням модулів пружності c_{11}^E , c_{12}^E , c_{11}^E і c_{33}^E визначаються модулі пружності c_{31}^E і c_{12}^E .

$$c_{31}^E = \sqrt{(c_{11}^E - c_{11}^E) c_{33}^E}; c_{12}^E = c_{12}^E - c_{11}^E + c_{11}^E.$$

19. За знайденим значенням модулів пружності c_{31}^E й c_{33}^E і числовому значенню параметра β_e^*

визначається параметр β_e відношення п'єзомодулів e_{31} і e_{33}

$$\beta_e = \frac{e_{31}}{e_{33}} = \beta_e^* + \frac{c_{31}^E}{c_{33}^E}.$$

20. По знайденим числовим значенням модулів пружності c_{11}^E , c_{12}^E , c_{31}^E і c_{33}^E визначаються компоненти s_{11}^E , s_{12}^E , s_{31}^E і s_{33}^E матриці пружних податливостей поляризованої п'єзокераміки

$$s_{11}^E = \frac{c_{11}^E c_{33}^E - (c_{13}^E)^2}{(c_{11}^E - c_{12}^E)(c_{11}^E + c_{12}^E) c_{33}^E - 2(c_{13}^E)^2},$$

$$s_{12}^E = \frac{c_{12}^E c_{33}^E - (c_{13}^E)^2}{(c_{11}^E - c_{12}^E)(c_{11}^E + c_{12}^E) c_{33}^E - 2(c_{13}^E)^2},$$

$$s_{31}^E = \frac{(c_{12}^E)^2 - c_{11}^E c_{13}^E}{(c_{11}^E - c_{12}^E)(c_{11}^E + c_{12}^E) c_{33}^E - 2(c_{13}^E)^2},$$

$$s_{33}^E = \frac{c_{11}^E + c_{12}^E}{(c_{11}^E + c_{12}^E) c_{33}^E - 2(c_{13}^E)^2}.$$

21. По знайдених компонентах матриці пружних податливостей s_{11}^E , s_{12}^E , s_{31}^E і s_{33}^E і параметрам β_z і β_e розраховується допоміжний параметр Λ_0

$$\Lambda_0 = 1 + \beta_z \left[2\beta_e^2 (s_{11}^E - s_{12}^E) + 4\beta_e s_{13}^E + s_{33}^E \right].$$

22. По вхідному параметру χ_3^σ - діелектричної проникності в режимі постійності механічних напруг - визначається діелектрична проникність у режимі постійності деформацій χ_3^σ

$$\chi_3^\sigma = \chi_3^\sigma / \Lambda_0.$$

23. За знайденим значенням діелектричної проникності в режимі постійності деформацій χ_3^σ , модуля пружності s_{33}^E і квадрату статичного коефіцієнта електромеханічного зв'язку при стиску - розтягненні K_3^2 визначається п'єзомодуль e_{33}

$$e_{33} = K_3 \sqrt{\chi_3^\sigma c_{33}^E}.$$

24. По відомому параметру β_e і знайденому значенню п'єзомодуля e_{33} визначаються п'єзомодулі e_{31} і e_{15}

$$e_{31} = \beta_e e_{33}; e_{15} = (e_{33} - e_{31})/2;$$

В Таблиці 3 наведені числові значення фізико-механічних констант п'єзокерамічного матеріалу марки PZT, які одержані з використанням запропонованого способу.

Таблиця 3

Вхідні величини		Фізико-механічні константи п'єзокерамічних матеріалів	
Символ, розмірність	Числове значення	Символ, розмірність	Числове значення
1	2	3	4
α , м	$3 \cdot 10^{-3}$	C_{33}^E , Па	$1,051 \cdot 10^{11}$
R , м	$33 \cdot 10^{-3}$	C_{11}^E , Па	$1,997 \cdot 10^{11}$
ρ_0 , кг/м ³	7400	C_{31}^E , Па	$1,151 \cdot 10^{11}$
C_0^σ , Ф	$37,2 \cdot 10^{-9}$	C_{12}^E , Па	$1,508 \cdot 10^{11}$
f_p , Гц	645025	χ_3^σ , Ф/м	$2,695 \cdot 10^{-9}$

Продовження табл.3

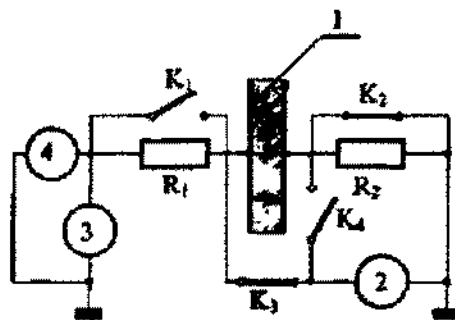
1	2	3	4
$f_a, \text{Гц}$	740025	$E_{33}, \text{Кл/м}^2$	10,51
$f_p^{(1)}, \text{Гц}$	31540	$e_{31}, \text{Кл/м}^2$	-8,37
$f_p^{(2)}, \text{Гц}$	82162	$e_{15}, \text{Кл/м}^2$	9,44
$f_{PB}^{(1)}, \text{Гц}$	6012		
$f_{PB}^{(2)}, \text{Гц}$	25485		
$f_{AB}^{(1)}, \text{Гц}$	6050		

Запропонована методика обробки результатів вимірювань частот електроmechanічних резонансів та антирезонансів радикальним образом відрізняється від усіх відомих версій способу резонансу - антирезонансу. Цей спосіб дозволяє розрахунковим шляхом за обмірюваним значенням частот резонансів та антирезонансів у трьох частотних діапазонах поляризованого по товщині диска визначити практично повний набір матеріальних констант п'єзокерамічного матеріалу. Це чотири компоненти тензора модулів пружності, один компонент тензора діелектричної проникності та три компоненти тензора п'єзomodулів. Запропонована

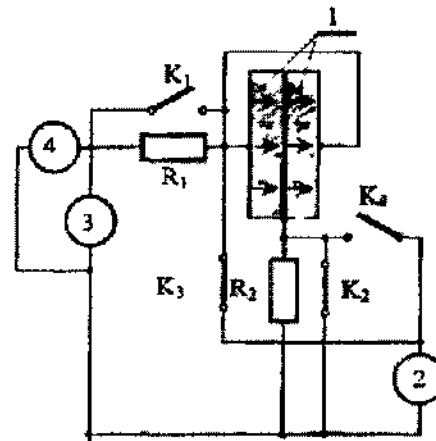
процедура визначення діелектричної проникності в режимі постійності деформацій п'єзоелектрика.

Джерела інформації:

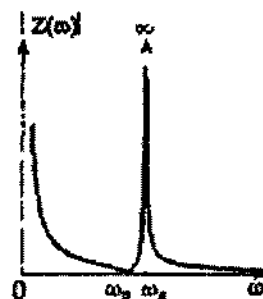
1. Авторське свідоцтво СРСР, №530279, кл. G01K29/22, G01R29/00, 1976.
2. Шульга Н.А., Болкисев А.М. Колебания пьезоэлектрических тел. - Киев: Наукова думка, 1990.
3. Патент Великобританії №2189612, кл. G01R27/00, G01R29/22, 1987.
4. Авторське свідоцтво СРСР №1648175, кл. G01R29/22, G03R3/02, 1989.
5. Авторське свідоцтво СРСР №1800406A1, кл. G01R29/22, 1993.



Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3



УКРАЇНА

(19) UA (11) 6210 (13) U

(51) 7 G01R29/22

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ КОНСТАНТ П'ЕЗОКЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

1

2

(21) 20041109024

(22) 04.11.2004

(24) 15.04.2005

(46) 15.04.2005, Бюл. №4, 2005р.

(72) Дідковський Віталій Семенович, Петрищев
Олег Миколайович, Шаблатович Андрій Микола-
йович(73) Дідковський Віталій Семенович, Петрищев
Олег Миколайович, Шаблатович Андрій Микола-
йович(57) 1. Спосіб визначення фізико-механічних кон-
стант п'єзокерамічних матеріалів, що включає по-
дачу на матеріал напруги змінної частоти, вимірю-
вання частот електромеханічних резонансів та
антирезонансів, обчислення констант п'єзокерамі-
чних матеріалів, який відрізняється тим, що п'є-
зокерамічний матеріал використовують у вигляді
дисків, а вимірювання частот електромеханічних
резонансів та антирезонансів здійснюють на висо-
ких, середніх та низьких частотах, причому на ни-
зьких частотах вимірювання здійснюють на склеє-
них дисках, а із констант п'єзокерамічних матеріа-
лів визначають модулі пружності, діелектричну
проникність та п'єзомодулі.2. Спосіб за п.1, який відрізняється тим, що диски
використовують однакового розміру, маси, складу,
технології виготовлення та статичної електричної
ємності, яка вимірюється на частоті 50 Гц.3. Спосіб за п.1, який відрізняється тим, що в
склеєних дисках електрична поляризація не змінює
своїєї орієнтації при переході через поверхню
поклеювання, а в електричну схему диски вклю-
чають зустрічно.4. Спосіб за п.1, який відрізняється тим, що вимі-
рювання здійснюють на високих частотах -
 $f = (1,75/\delta_{\text{мм}}) \cdot 10^6$ Гц, де $\delta_{\text{мм}}$ - товщина диска в
міліметрах, на середніх частотах -
 $f_{\text{CP}} = (1,1/R_{\text{см}}) \cdot 10^5$ Гц, де $R_{\text{см}}$ - радіус п'єзокера-
мічного диска в сантиметрах, та на низьких частот-
ах - $f_{\text{нч}} = 2,9 (\delta_{\text{мм}}/R_{\text{см}}^2) \cdot 10^4$ Гц.5. Спосіб за п.1, який відрізняється тим, що мо-
дулі пружності п'єзокераміки розраховують за фо-
рмулами:

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

де C_{33}^D - модуль пружності, Па, K_3^2 - квадрат коефіцієнта електромеханічного
зв'язку,

$$C_{11}^E = \frac{48\pi^2 \rho_0 R^4 (f_{\text{PB}}^{(1)})^2}{\alpha^2 (1 + K_{31}^2) y_1^4}, \text{ Па,}$$

де ρ_0 - щільність, кг/м³ R - радіус диска, м α , м - товщина диска, м y_1^4 - четверта ступінь першого кореня частотного
рівняння коливань вигину (безрозмірне хвильове
число), $f_{\text{PB}}^{(1)}$ - частота першого електромеханічного резо-
нансу, Гц, K_{31}^2 - квадрат статичного коефіцієнта електромех-
анічного зв'язку;

$$C_{31}^E = \sqrt{(C_{11}^E - C_{11}^*) C_{33}^E}, \text{ Па,}$$

$$C_{12}^E = C_{12}^* - C_{11}^* + C_{11}^E, \text{ Па,}$$

де C_{11}^* , C_{12}^* - приведені модулі пружності, Па.6. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що ви-
значають діелектричну проникність за формулою:

$$\chi_3^E = \chi_3^G / \Lambda_0, \text{ Ф/м,}$$

де χ_3^E - діелектрична проникність в режимі сталос-
ті механічних напруг, Λ_0 - допоміжний параметр.

(19) UA (11) 6210 (13) U

7 Спосіб за п 1, який відрізняється тим, що визначають п'єзомодулі за формулами

$$e_{33} = K_3 \sqrt{\chi_3^* c_{33}^E}, \text{ Кл/м}^2,$$

де K_3 - коефіцієнт електромеханічного зв'язку,

$$e_{31} = \beta_e e_{33}, \text{ Кл/м}^2$$

де β_e - допоміжний параметр,

$$e_{15} = (e_{33} - e_{31})/2$$

Запропонована корисна модель відноситься до вимірювальної техніки і технічної акустики і може бути використана при перевірці та тарировці п'єзокерамічних матеріалів у процесі їх виробництва та використання.

Відомий спосіб ультразвукового визначення констант п'єзокерамічних матеріалів, який включає вимірювання швидкостей, розповсюдження ультразвукових хвиль в повздовжньому та поперечному напрямках до остаточної поляризації п'єзокерамічних зразків [1].

Недоліками цього способу є складність підготовки зразків до вимірювання і складність забезпечення плоских хвиль, які повинні поширюватися в строго визначених напрямках відносно кристалографічних осей і при цьому мати наперед задану поляризацію. Крім цього, обробка результатів вимірювання швидкостей поширення плоских хвиль неможлива без знання числових значень компонентів тензора діелектричної проникності в режимі постійності деформацій п'єзоелектрика. У різних версіях ультразвукового способу ці величини передбачаються заздалегідь відомими. Тому що в цьому способі діелектричні проникності не вимірюються по визначенню, тому він не може розглядатися як самостійний і замкнений спосіб для визначення фізико-механічних констант п'єзокерамічних матеріалів.

Відомий також спосіб кругових діаграм для визначення зазначених констант, який базується на математичній моделі електричного імпедансу досліджуваного зразка [2, 3]. Вірогідність результатів, що можна одержати за допомогою цього способу, визначаються ступенем адекватності математичної моделі реальному об'єкту. Суть способу полягає у вимірюванні дійсної і уявної частини електричного імпедансу п'єзокерамічного зразка на великій кількості різних значень частот. За результатами цих вимірювань будується кругова діаграма комплексного опору чи провідності і по характеристичним крапкам на діаграмі визначаються константи п'єзоелектричних матеріалів. Спосіб кругових діаграм вимагає дорогої апаратури і великого обсягу вимірювань. До причин, що перешкоджають досягненню очікуваного технічного результату при використанні відомого способу відноситься те, що для визначення констант п'єзокераміки необхідно проводити вимірювання на зразках різної форми і різної поляризації. При цьому виникають погрішності. Це означає, що п'єзоелектричні константи і діелектричні проникності різних за формою зразків, виготовлених з однакової вихідної сировини, можуть відрізнятися один від одного. Якщо, до

того ж різні за формою зразки поляризовані в різних напрямках, то числові значення п'єзомодулів цих зразків будуть обов'язково відрізнятися. Ці погрішності практично не піддаються оцінюванню і питання про достовірність обмірюваних числових значень констант залишається без відповіді.

Найбільш близьким способом такого ж призначення до заявленого є спосіб резонансу - антирезонансу, відповідно до якого здійснюється вимірювання частот електромеханічних резонансів та антирезонансів сталих коливань досліджуваних зразків [4, 5]. Як і в способі кругових діаграм, теоретичною основою є математична модель електричного імпедансу досліджуваного зразка. З цієї причини всі погрішності способу кругових діаграм мають місце і у відомому способі резонансу - антирезонансу. Спосіб резонансу-антирезонансу вирає в порівнянні зі способом кругових діаграм так як він не вимагає застосування дорогої апаратури і значної кількості складних вимірювань.

До причин, що перешкоджають досягненню очікуваного технічного результату при використанні відомого способу слід віднести те, що є повна неясність у порядку визначення числових значень діелектричної проникності в режимі постійності деформацій п'єзоелектрика.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення способу резонансу-антирезонансу вимірювання фізико-механічних параметрів п'єзокерамічних матеріалів, шляхом забезпечення замкнутого циклу вимірювання основних параметрів.

Поставлена задача вирішується тим, що п'єзокерамічний матеріал використовують у вигляді дисків, а вимірювання 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 вимірювання здійснюють на склеєних дисках, а диски використовують однакового розміру, маси, складу, технології виготовлення та статичної електричної ємності, яка вимірюється на частоті 50 Гц. В склеєних дисках електрична поляризація не змінює своєї орієнтації при переході через поверхню поклейки, а в електричну схему диски включають зустрічне, при цьому вимірювання здійснюють на низьких частотах - $f_{HЧ} = 2,9 (\alpha_{mm}/R_{cm}^2) 10^4$ Гц. Для одиночного диска вимірювання здійснюють на високих частотах - $f = (1,75/\alpha_{mm}) 10^6$ Гц, де α_{mm} - товщина диска в міліметрах, середніх частотах - $f_{cp} = (1,1/R_{cm}) 10^5$ Гц, де R_{cm} - радіус п'єзокерамічного диска в сантиметрах.

Модулі пружності п'єзокераміки розраховують по формулам:

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

$$C_{11}^E = \frac{48\pi^2 \rho_0 R^4 (f_{PB}^{(1)})^2}{\alpha^2 (1 + K_3^2) Y_1^4};$$

$$C_{31}^E = \sqrt{(C_{11}^E - C_{11}^*) C_{33}^E}; C_{12}^E = C_{12}^* - C_{11}^* + C_{11}^E.$$

визначають діелектричну проникність по формулі:

$$\chi_3^E = \chi_3^D / \Lambda_0.$$

а також визначають п'єзомодулі по формулам:

$$e_{33} = K_3 \sqrt{\chi_3^E C_{33}^E}; e_{31} = \beta_e e_{33}; e_{15} = (e_{33} - e_{31})/2$$

Виходячи із зазначеного, саме поєднання відомих наведених ознак і сукупність суттєвих ознак способу, що заявляється, забезпечують виявлення нових технічних властивостей корисної моделі, які пов'язані із забезпеченням замкнутого циклу вимірювання основних фізико-механічних параметрів п'єзокерамічних матеріалів, зокрема чотирьох компонент тензора модулів пружності, одного компонента тензора діелектричної проникності і трьох компонент тензора п'єзомодулів, крім цього виключені погрішності, які обумовлені розходженням технологій виготовлення досліджуваних зразків.

Визначення фізико-механічних констант п'єзокерамічних матеріалів згідно запропонованого способу здійснюється шляхом відбору трьох однакових по розміру і поляризованих по товщині п'єзокерамічних дисків (товщина α і радіус R), масі m (отже, однакової щільності $\rho = m/(\pi\alpha R^2)$) з статич-

ною електричною ємністю C_0^D , що вимірюється на частоті 50 Гц, зразка. Однакова для всіх дисків величина C_0^D відповідає однаковій для всіх дисків діелектричній проникності п'єзокераміки

$\chi_3^E = \alpha C_0^D / (\pi R^2)$ обмірюваної в режимі постійності механічних напруг σ . Розміри дисків вибирають максимально великими, щоб звести до мінімуму вплив приєднаних мас, що виникають при пайці провідників електричного струму, на параметри і характеристики деформованого стану дисків і мінімізувати верхню граничну частоту частотного діапазону, у якому слід вимірювати частоти електромеханічних резонансів та антирезонансів дисків, які коливаються. Чим менше ця гранична частота, тим менший вплив на результати вимірювань роблять паразитні реактивності електричної схеми, у яку включаються п'єзокерамічні диски.

Два диски склеюють між собою так, що напрямки електричної поляризації матеріалу дисків не змінює своєї орієнтації при переході через поверхню поклейки. Напрямок електричної поляризації матеріалу дисків (позиції 1 на Фіг.1 і Фіг.2) показані стрілками. На Фіг.1 зображено включення в електричну схему одного п'єзокерамічного диска. На Фіг.2 зображено включення в електричну схему двох склеєних дисків, що утворюють біморфний п'єзоелектричний елемент.

З використанням схеми на Фіг.1, роблять вимірювання частот електромеханічних резонансів та антирезонансів у діапазоні високих частот чи у режимі товщинних коливань і в області середніх частот чи у режимі планарних коливань. Діапазон високих частот - це найближча околиця частоти $f = (1,75/\alpha_{\text{мм}}) \cdot 10^6$ Гц, де $\alpha_{\text{мм}}$ - товщина диска в міліметрах. Діапазон середніх частот - це околиця частоти $f_{\text{ср}} = (1,1/R_{\text{см}}) \cdot 10^5$ Гц, де $R_{\text{см}}$ - радіус п'єзокерамічного диска в сантиметрах. По схемі, показаній на Фіг.2, роблять вимірювання частот першого електромеханічного резонансу та антирезонансу в режимі сталих коливань поперечного вигину в області низьких частот. Область низьких частот для біморфного п'єзоелектричного елемента розташовується на околиці частоти $f_{\text{нч}} = 2,9 (\alpha_{\text{мм}}/R_{\text{см}}^2) \cdot 10^4$ Гц. Для дисків з діаметром $2R > 50$ мм і товщиною $\alpha > 2$ мм напружено - деформований стан вигину існує в діапазоні частот 5...30 Гц, режим сталих радіальних коливань існує в діапазоні частот від 30 до 100 Гц а товщинні коливання диска існують у діапазоні частот від 0,5 до 1 МГц.

На Фіг.1 і Фіг.2 позицією 2 відзначений чутливий електронний вольтметр, 3 - генератор гармонічних коливань, значення частоти вихідного сигналу якого регулюється, 4 - електронний частотомір. Резистори R_1 і R_2 однакові і вибираються опором 100 Ом.

На Фіг.3 зображено коливання диска та зміна модуля електричного імпедансу в області високих частот (у режимі товщинних коливань), при підході до частот електромеханічного резонансу та антирезонансу.

При підході до частоти електромеханічного резонансу (символ ω_p на Фіг.3) з області більш низьких частот, тобто ліворуч по осі частот, модуль електричного імпедансу п'єзокерамічного диска, який коливається, різко зменшується, досягаючи абсолютного мінімуму на частоті ω_p . При такому положенні ключів $K_1...K_4$, яке показано на Фіг.1, показання вольтметра 2 на частоті ω_p будуть мінімальними. Використовуючи шкалу вольтметра з максимальною чутливістю, можна досить точно визначити те значення частоти, при якій спостерігається абсолютний мінімум показань вольтметра 2. Це значення частоти буде відповідати частоті першого електромеханічного резонансу. Після вимірювання значення частоти резонансу ключі $K_1...K_4$ переключуються, тобто ключі K_1, K_4 замикаються, а ключі K_2, K_3 - розмикаються. При підході до частоти електромеханічного антирезонансу модуль електричного імпедансу диска, який коливається, досягає максимальних значень і, отже, на резисторі R_2 вольтметром 2 фіксується мінімальне спадання електричної напруги. Частота більша аніж ω_p на якій спостерігається абсолютний мінімум показань вольтметра 2, відповідає частоті першого електромеханічного антирезонансу. Значення частот резонансу та антирезонансу точно фіксуються електронним частотоміром 4.

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

Продовження табл. 2

ξ_0	Y_1	Y_2	(X_{21})
0,525	3,060349	6,229433	2,035530
0,530	3,058764	6,228626	2,0363212
0,535	3,057173	6,227817	2,0371163
0,540	3,055575	6,227007	2,0379166
0,545	3,053970	6,226196	2,0387221
0,550	3,052358	6,225383	2,0395324
0,555	3,050739	6,224568	2,0403476
0,560	3,049113	6,223752	2,041168
0,565	3,047480	6,222934	2,0419934
0,570	3,045840	6,222115	2,042824
0,575	3,044193	6,221294	2,043660
0,580	3,042538	6,220471	2,0445007
0,585	3,040876	6,219647	2,0453471
0,590	3,039207	6,218822	2,0461989
0,595	3,037531	6,217995	2,0470557
0,600	3,035847	6,217166	2,047918

поперечних коливань на частоті першого електромеханічного резонансу y_1 і по обмірюваній частоті першого електромеханічного резонансу $f_{PB}^{(1)}$

визначається модуль пружності c_{11}^E .

$$c_{11}^E = \frac{48\pi^2 \rho_0 R^4 (f_{PB}^{(1)})^2}{\alpha^2 (1 + K_{31}^2) Y_1^4};$$

18. За знайденим значенням модулів пружності c_{11}^* , c_{12}^* , c_{11}^E і c_{33}^E визначаються модулі пружності c_{31}^E і c_{12}^E .

$$c_{31}^E = \sqrt{(c_{11}^E - c_{11}^*) c_{33}^E}; c_{12}^E = c_{12}^* - c_{11}^* + c_{11}^E.$$

19. За знайденим значенням модулів пружності c_{31}^E й c_{33}^E і числовому значенню параметра β_θ визначається параметр β_θ відношення п'єзомодулів e_{31} і e_{33}

$$\beta_\theta = \frac{e_{31}}{e_{33}} = \beta_\theta^* + \frac{c_{31}^E}{c_{33}^E}.$$

20. По знайденим числовим значенням модулів пружності c_{11}^E , c_{12}^E , c_{31}^E і c_{33}^E визначаються компоненти s_{11}^E , s_{12}^E , s_{31}^E і s_{33}^E матриці пружних податливостей поляризованої п'єзокераміки

$$s_{11}^E = \frac{c_{11}^E c_{33}^E - (c_{13}^E)^2}{(c_{11}^E - c_{12}^E)[(c_{11}^E + c_{12}^E) c_{33}^E - 2(c_{13}^E)^2]},$$

$$s_{12}^E = \frac{c_{12}^E c_{33}^E - (c_{13}^E)^2}{(c_{11}^E - c_{12}^E)[(c_{11}^E + c_{12}^E) c_{33}^E - 2(c_{13}^E)^2]},$$

$$s_{31}^E = \frac{(c_{12}^E)^2 - c_{11}^E c_{13}^E}{(c_{11}^E - c_{12}^E)[(c_{11}^E + c_{12}^E) c_{33}^E - 2(c_{13}^E)^2]},$$

$$s_{33}^E = \frac{c_{11}^E + c_{12}^E}{(c_{11}^E + c_{12}^E) c_{33}^E - 2(c_{13}^E)^2}.$$

21. По знайдених компонентах матриці пружних податливостей s_{11}^E , s_{12}^E , s_{31}^E і s_{33}^E і параметрам β_z і β_θ розраховується допоміжний параметр Λ_0

$$\Lambda_0 = 1 + \beta_z \left[2\beta_\theta^2 (s_{11}^E - s_{12}^E) + 4\beta_\theta s_{13}^E + s_{33}^E \right].$$

22. По вхідному параметру χ_3^σ - діелектричної проникності в режимі постійності механічних напруг - визначається діелектрична проникність у режимі постійності деформацій χ_3^σ

$$\chi_3^E = \chi_3^\sigma / \Lambda_0.$$

23. За знайденим значенням діелектричної проникності в режимі постійності деформацій χ_3^σ ,

модуля пружності s_{33}^E і квадрату статичного коефіцієнта електромеханічного зв'язку при стиску - розтягненні K_3^2 визначається п'єзомодуль e_{33}

$$e_{33} = K_3 \sqrt{\chi_3^E c_{33}^E}.$$

24. По відомому параметру β_θ і знайденому значенню п'єзомодуля e_{33} визначаються п'єзомодулі e_{31} і e_{15}

$$e_{31} = \beta_\theta e_{33}; e_{15} = (e_{33} - e_{31})/2;$$

В Таблиці 3 наведені числові значення фізико-механічних констант п'єзокерамічного матеріалу марки PZT, які одержані з використанням запропонованого способу.

Таблиця 3

Вхідні величини		Фізико-механічні константи п'єзокерамічних матеріалів	
Символ, розмірність	Числове значення	Символ, розмірність	Числове значення
1	2	3	4
α , м	$3 \cdot 10^{-3}$	c_{33}^E , Па	$1,051 \cdot 10^{11}$
R , м	$33 \cdot 10^{-3}$	c_{11}^E , Па	$1,997 \cdot 10^{11}$
ρ_0 , кг/м ³	7400	c_{31}^E , Па	$1,151 \cdot 10^{11}$
C_0^σ , Ф	$37,2 \cdot 10^{-9}$	c_{12}^E , Па	$1,508 \cdot 10^{11}$
f_p , Гц	645025	χ_3^E , Ф/м	$2,695 \cdot 10^{-9}$

Продовження табл.3

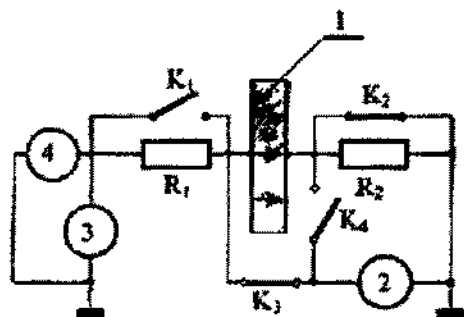
1	2	3	4
$f_a, \text{Гц}$	740025	$E_{33}, \text{Кл/м}^2$	10,51
$f_p^{(1)}, \text{Гц}$	31540	$e_{31}, \text{Кл/м}^2$	-8,37
$f_p^{(2)}, \text{Гц}$	82162	$e_{15}, \text{Кл/м}^2$	9,44
$f_{pB}^{(1)}, \text{Гц}$	6012		
$f_{pB}^{(2)}, \text{Гц}$	25485		
$f_{aB}^{(1)}, \text{Гц}$	6050		

Запропонована методика обробки результатів вимірювань частот електромеханічних резонансів та антирезонансів радикальним образом відрізняється від усіх відомих версій способу резонансу - антирезонансу. Цей спосіб дозволяє розрахунковим шляхом за обмірюваним значенням частот резонансів та антирезонансів у трьох частотних діапазонах поляризованого по товщині диска визначити практично повний набір матеріальних констант п'єзокерамічного матеріалу. Це чотири компоненти тензора модулів пружності, один компонент тензора діелектричної проникності та три компоненти тензора п'єзомодулів. Запропонована

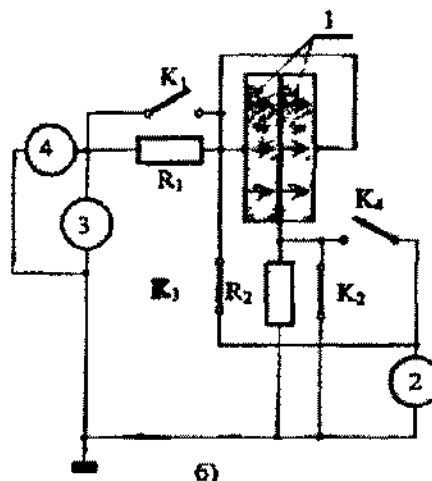
процедура визначення діелектричної проникності в режимі постійності деформацій п'єзoeлектрика.

Джерела інформації:

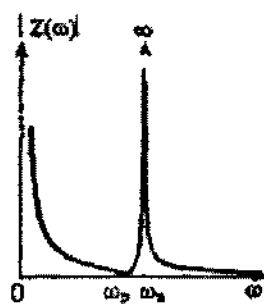
1. Авторське свідоцтво СРСР, №530279, кл. G01K29/22, G01R29/00, 1976.
2. Шульга Н.А., Болкисев А.М. Колебания пьезоэлектрических тел. - Киев: Наукова думка, 1990.
3. Патент Великобританії №2189612, кл. G01R27/00, G01R29/22, 1987.
4. Авторське свідоцтво СРСР №1648175, кл. G01R29/22, G03R3/02, 1989.
5. Авторське свідоцтво СРСР №1800406A1, кл. G01R29/22, 1993.



Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3

