

УДК 539.3

Андрущенко В. О.¹, пров. інж.,
Борисейко О. В.², к. ф.-м. н., доц.,
Улітко І. А.³, к. ф.-м. н., доц.,
Яцків С. Ю.⁴, магістр

Спектр резонансних частот біморфних п'єзоелементів

Розглядаються задачі про стаціонарні коливання біморфних п'єзокерамічних елементів. Проведені експериментальні дослідження згинних та планарних коливань круглої платівки та стержня. Визначені частоти резонансу та антирезонансу. Отримані значення КЕМЗ за формулою Мезона та за енергетичним критерієм. Наведені результати аналітичних розрахунків.

Ключові слова: біморфний елемент, стержень, диск, КЕМЗ, резонанс, антирезонанс, експеримент.

¹ Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, просп. Глушкова, 4 е
e-mail: andron@univ.kiev.ua, b12313@ukr.net,
ulitko@univ.kiev.ua, sofia1432@mail.ru

Вступ

В сучасних приладах та пристроях ультразвукової техніки набули широкого застосування елементи конструкцій, в яких проявляються ефекти зв'язаності фізико-механічних полів. Термічні, магнітні, електричні навантаження таких елементів приводять до їх деформування, а отже, до виникнення полів механічних напружень. Навпаки, механічна деформація елемента призводить до його розігріву, а для елементів з п'єзо- та феромагнітними властивостями – до виникнення електромагнітного поля. В елементах конструкцій з п'єзокераміки реалізуються як статичне деформування, так і динамічні коливальні режими.

Постійний інтерес дослідників до вивчення п'єзоефекту та зв'язаних електромеханічних деформівних процесів обумовлений розвитком п'єзосенсорів та п'єзоактуаторів та задачами їх імплантації в технологіях МЕМС.

Якість роботи будь-яких пристроїв, в яких використовується п'єзоефект, суттєво залежить від ефективності перетворення в п'єзоелементі механічної енергії в електричну чи навпаки. Аналогією коефіцієнта корисної дії для таких п'єзокерамічних елементів є статичні та динамічні коефіцієнти електромеханічного зв'язку (КЕМЗ).

V. O. Andruschenko¹, Principal Engineer,
O. V. Boryseiko¹, PhD (Phys.-Math.), Ass. Prof.,
I. A. Ulitko¹, PhD (Phys.-Math.), Ass. Prof.,
S. Yu. Yatskiv, MS

Resonance spectra of bimorph piezoceramic elements

Time harmonic vibrations of bimorph piezoceramic elements are considered. The both bending and planar modes of circular plate and prismatic rod have been studied in experiment. Resonance and antiresonance frequencies have been defined. The values of EMCF are obtained by Mason's formula and by energy criterion. Results of theoretical calculation are presented.

Key Word: bimorph element, rod, disk, EMCF, resonance, antiresonance, experiment.

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova avenue, 4 e
e-mail: andron@univ.kiev.ua, b12313@ukr.net,
ulitko@univ.kiev.ua, sofia1432@mail.ru

Тому проблема визначення резонансних робочих частот елементів з п'єзокераміки у зв'язку з оцінкою ефективності перетворення енергії на цих частотах є, поза сумнівом, важливою в динамічній теорії електропружності. У переважній більшості випадків найефективнішою є робота п'єзоелемента на першій головній частоті даного спектру. Для підвищення значення КЕМЗ на вищих резонансних частотах та для вирішення низки технічних задач використовується керований підвід електричного навантаження до елемента, наприклад, протифазне навантаження відокремлених ділянок поверхневих електродів стержнів, платівок та оболонкових елементів з п'єзокераміки [1, 2].

З іншого боку, використання багатоелектродних шаруватих структур з п'єзокераміки за рахунок неоднорідності поля деформацій при різних типах навантажень дає змогу отримати елементи з декількома наборами робочих частот і форм коливань. Ефективність роботи елементів на перших частотах цих спектрів можна оцінити за енергетичним критерієм та за допомогою наближених емпіричних підходів. В даній роботі досліджується задача про зв'язані електромеханічні планарні та згинні коливання біморфних стержнів та круглих платівок з п'єзокераміки.

Постановка задачі

Розглядаються гармонічні планарні та згинні коливання біморфного п'єзокерамічного стержня з розмірами $2l \times 2b \times h$ та диска з радіусом a і товщиною h під дією змінного в часі електричного поля з круговою частотою ω . Структура елементів вказана на рис. 1.

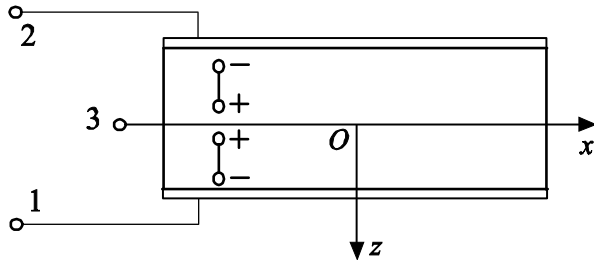


Рис. 1. Структура біморфного п'єзоелемента

Дослідження проводились для двох типів підключення поверхневих електродів біморфних п'єзоелементів.

I. Електроди (1) та (2) при $z = \pm h/2$ навантажуються змінним у часі електричним полем

$$\psi|_{z=\pm h/2} = \pm \frac{1}{2} V_0(t) e^{i\omega t},$$

електрод (3) – не навантажений. Збуджуються згинні коливання.

II. Електроди (1) та (2) паралельно навантажуються протифазно до електричного навантаження електрода (3). В результаті виникають планарні коливання.

Усі поверхні п'єзоелементів вільні від механічних навантажень.

Результати експериментальних досліджень

Дослідження частотних спектрів описаних вище п'єзоелементів та ефективності перетворення енергії проводились за допомогою експериментальної установки, структурна схема якої наведена на рис. 2.

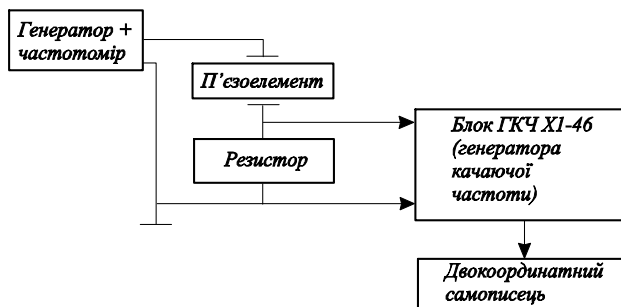


Рис. 2. Схема експериментальної установки

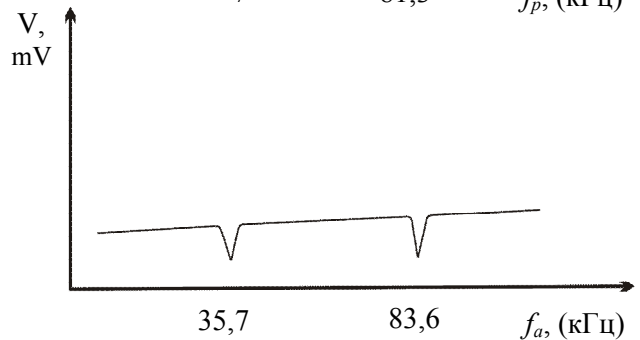
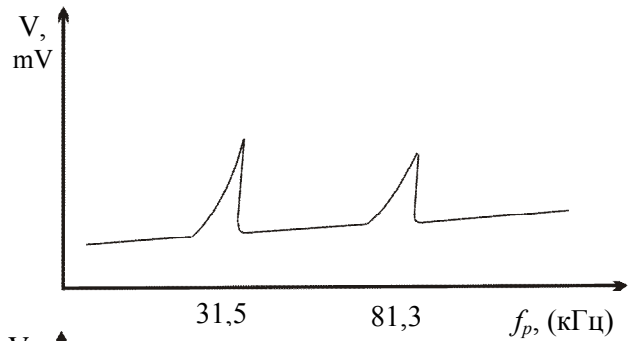


Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики радіальних форм коливань біморфного диска

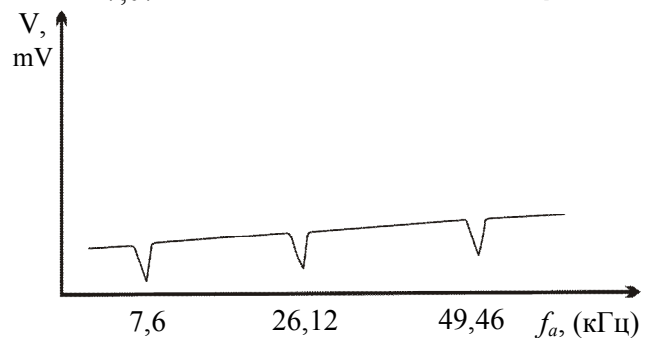
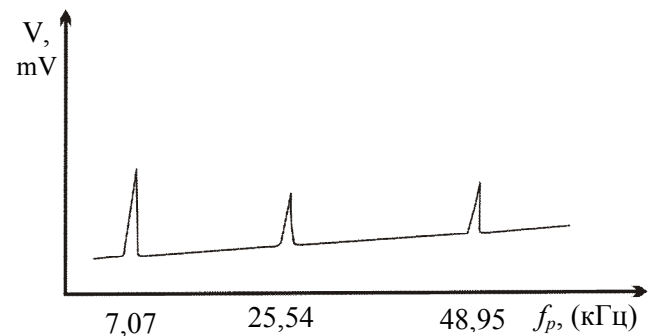


Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики згинних форм коливань біморфного диска

На рис. 3-4 наведені відповідні амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) радіальних та згинних форм коливань біморфного диска діаметром $2r = 63$ мм та товщини $h = 6$ мм, виготовленого з кераміки ЦТС-19. Коефіцієнти електромеханічного зв'язку, обчислені за формулою Мезона [3], мають наступні значення:

- для випадку планарних коливань: $k_{d,1}^2 = 0,221$;
 $k_{d,2}^2 = 0,056$;
– для випадку згинних коливань: $k_{d,1}^2 = 0,135$;
 $k_{d,2}^2 = 0,044$.

Порівняння з відомими аналітичними результатами

Таблиця 1

Безрозмірні резонансні й антирезонансні частоти та КЕМЗ на згинних коливаннях біморфного стержня [4]

№	$(\beta l)_p$	$(\beta l)_a$	k_d^2 (Мезон)	k_d^2 енерг. критерій
1	2,365	2,4	0,0289	0,0365
2	5,5	5,51	0,0058	0,0072
3	8,639	8,650	0,0024	0,003

Таблиця 2

Безрозмірні резонансні й антирезонансні частоти та КЕМЗ на згинних коливаннях біморфного диска [5]

№	$(\beta a)_p$	$(\beta a)_a$	k_d^2 (Мезон)	k_d^2 енерг. критерій
1	3,170	3,068	0,0634	0,1749
2	6,291	6,235	0,0180	0,0468
3	9,428	9,389	0,0082	0,0212

Для випадку планарних коливань одношарових п'єзоелементів перші безрозмірні резонансні та антирезонансні частоти та відповідні КЕМЗ мають наступні значення [6, 7]. Диск з п'єзокераміки PZT-4: $(\kappa a)_p = 2,07$; $(\kappa a)_a = 2,39$; $k_d^2 = 0,25$ (за Мезоном); $k_d^2 = 0,29$ (за енергетичним критерієм). Стержень з п'єзокераміки PZT-4: $(\kappa l)_p = 1,57$; $(\kappa l)_a = 1,65$; $k_d^2 = 0,09$ (за Мезоном); $k_d^2 = 0,108$ (за енергетичним критерієм).

Висновки

Таким чином, біморфні п'єзоелементи дозволяють за рахунок керованого підводу електричного навантаження отримати два спектри частот: на згинній деформації (більш низькі частоти) та на планарній деформації (більш високі). Динамічні КЕМЗ на частотах згинних коливань мають нижчі значення, ніж на частотах планарних коливань. Зауважимо, що у випадку статичної згинної деформації п'єзоелементів біморфної структури, вказаної на рис. 1, статичний КЕМЗ складає 75 відсотків статичного КЕМЗ для випадку планарної деформації одношарового п'єзоелемента з товщиною поляризацією [6, 7].

Список використаних джерел

1. *Boriseyko O. V.* Planar vibrations of a piezoceramic disk with antiphase excitation // Bulletin of Kyiv University. Ser.: Phys.-Math. Sci. – 2001. – No 3. – P. 89-94. (in Ukrainian).
2. *Boriseyko O. V., Panasiuk O. M., Ulitko I. A.* Vibrations of piezoceramic rod with splitted electrodes // Bulletin of Kyiv University. Ser.: Phys.-Math. Sci. – 2006. – No 3. – P. 89-97. (in Ukrainian).
3. *Mason W. P.* Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics. – New York: D. Van Nostrand, 1950. – 508 p.
4. *Boriseyko O. V., Nikitenko V. M., Pavlyk A. O., Ulitko I. A.* Bending vibrations of bimorph piezoceramic rod // Bulletin of Kyiv University. Ser.: Phys.-Math. Sci. – 2008. – No 3. – P. 57-60. (in Ukrainian).
5. *Boriseyko O. V., Ostapchuk V. V., Ulitko I. A.* Determination of dynamic EMCF on bend vibrations of a round bimorph plate // Bulletin of Kyiv University. Ser.: Mathematics & Mechanics. – 2006. – No 17. – P. 45-48. (in Ukrainian).
6. *Grinchenko V. T., Ulitko A. F., Schul'ga N. A.* Electroelasticity // Mechanics of conjugated fields in the elements of constructions. 5 / Edt. A. N. Guz', Ac. Sci. Ukrainian SSR, Inst. Mechanics. – Kiev: Naukova Dumka, 1989. – 280 p. (in Russian).
7. *Ulitko A. F., Boriseyko O. V., Ulitko I. A.* Applied methods in the problems of electroelasticity. – Kyiv: VPC "Kyivsky universytet", 2007. – 127 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редколегії 15.05.13