



УДК 539.3:537.226.86:534.1

О. І. Безверхий, Л. П. Зінчук, В. Л. Карлаш

## Основи ітераційної методології з уточненого визначення коефіцієнтів електромеханічного зв'язку в п'єзокерамічних резонаторах

(Представлено академіком НАН України В. Д. Кубенком)

*На прикладі відомих задач про поздовжні коливання тонкого п'єзокерамічного стержня з поперечною поляризацією і радіальні коливання тонкої круглої п'єзокерамічної пластини з суцільними електродами викладаються основи нової розрахунково-експериментальної ітераційної методології, яка дає можливість визначати з високою точністю коефіцієнти електромеханічного зв'язку і параметри втрат енергії.*

**Ключові слова:** п'єзокерамічний стержневий резонатор, розрахунково-експериментальна ітераційна методологія, показники втрат енергії.

Сама природа внутрішніх фізичних процесів у п'єзоелектричних тілах призводить до того, що всі їхні електропружні параметри (зміщення, напруження, провідність, імпеданс коливної швидкість, миттєва потужність тощо) мають біля резонансних частот як активні, так і реактивні компоненти [1–4]. Щоб розрахувати будь-яку амплітуду, треба враховувати втрати енергії [5–9].

Ефективність перетворення електричної енергії в механічну й навпаки характеризується так званими коефіцієнтами електромеханічного зв'язку (скорочено КЕМЗ), які визначаються за наближеними формулами через відношення антирезонансної та резонансної частот.

З проблемою втрат енергії в п'єзоелектричних резонаторах вчені зустрілися давно й намагалися розв'язати її різними способами [1–10]. Понад 60 років тому було показано, що врахування діелектричних (викликаних недосконалістю процесу перезаряджання діелектриків) і пружних (викликаних недосконалістю процесу деформування) втрат енергії недостатньо для адекватного аналітичного описання енергетичних процесів у п'єзоелектричних тілах і було запропоновано враховувати також особливі, так звані п'єзоелектричні втрати, викликані недосконалістю самого процесу перетворення енергії.

Поперечно поляризовані п'єзокерамічні стержні давно вже стали “пробним каменем” у багатьох експериментальних дослідженнях насамперед тому, що їхні коливання описуються простими математичними формулами, а перший оберто́н лежить далеко по частоті

© О. І. Безверхий, Л. П. Зінчук, В. Л. Карлаш, 2015

від основного резонансу [1, 8–9]. Поздовжні коливання тонких п'єзокерамічних стержнів у зарубіжних публікаціях нерідко називають модою  $k_{31}$  [8, 9].

Радіальні резонансні коливання тонких п'єзокерамічних круглих дисків, які в зарубіжній літературі часто називають модою  $k_p$ , також характеризуються моночастотністю — перший обертоном віддалений по частоті від основного резонансу щонайменше у два з половиною рази [1–4, 6]. Ця обставина, а також висока інтенсивність електромеханічних коливань на основному резонансі та добре виражена залежність характеристичних частот від коефіцієнта Пуассона зумовили використання резонансних частот радіальних коливань і їхніх відношень для експериментального визначення кількох важливих параметрів п'єзокераміки, таких як планарний КЕМЗ  $k_p$ , поперечний КЕМЗ  $k_{31}$ , п'єзомодуль  $d_{31}$ , коефіцієнт Пуассона  $\nu$ , компоненти пружної податливості  $s_{11}$ ,  $s_{12}$ .

На цей час опрацьовано й опубліковано чимало методологій для визначення КЕМЗ і коефіцієнтів втрат енергії. Усі вони базуються на використанні різних наближених формул.

В цьому повідомленні на прикладі відомих задач про поздовжні коливання тонкого п'єзокерамічного стержня з поперечною поляризацією і радіальні коливання тонкої круглої п'єзокерамічної пластини з суцільними електродами викладаються основи нової розрахунково-експериментальної ітераційної методології, яка дає можливість визначати з високою точністю коефіцієнти електромеханічного зв'язку і показники втрат енергії при коливаннях п'єзорезонаторів шляхом порівняння розрахованих величин повної провідності з виміряними в околі резонансних і антирезонансних частот. Результати розрахунків добре узгоджуються із експериментальними даними.

**Розрахункові співвідношення для повної провідності стержнів і дисків.** Як показано в роботах [3–7], усі відомі вирази для повної провідності  $Y$  у діапазоні частот можна звести до єдиної формули (позначення тут і далі збігаються з позначеннями робіт [1–7]):

$$Y = j\omega C_0 \frac{\Delta_a}{\Delta_r}. \quad (1)$$

Тут  $j$  — уявна одиниця;  $\omega$  — кругова частота;  $C_0$  — статична міжелектродна ємність;  $\Delta_a$ ,  $\Delta_r$  — антирезонансний і резонансний визначники.

Повна провідність п'єзоелектричного зразка на будь-якій частоті  $\epsilon$ , таким чином, добутком реактивної провідності його міжелектродної ємності на цій частоті на відношення двох визначників — антирезонансного до резонансного — на тій же частоті. Всі електропружні коефіцієнти, безрозмірні частоти та їхні функції вважаються комплексними [2, 3, 10]:

$$s_{11}^E = s_{110}(1 - js_{11m}), \quad \varepsilon_{33}^T = \varepsilon_{330}(1 - j\varepsilon_{33m}), \quad d_{31} = d_{310}(1 - jd_{31m}). \quad (2)$$

При поздовжніх коливаннях стержня з поперечною поляризацією завдовжки  $l$ , завширшки  $w$  і завтовшки  $h$  можемо записати [1]

$$\Delta_r(x) = \cos(x), \quad \Delta_a(x) = (1 - k_{31}^2)\Delta_r(x) + k_{31}^2 \frac{\sin x}{x} \\ \left( x = \frac{kl}{2}, \quad k^2 = \rho\omega^2 s_{11}^E \right), \quad (3)$$

а також

$$C_b = C_{0b}(1 - j\varepsilon_{33m}), \quad x = x_0(1 - 0,5js_{11m}), \quad C_{0b} = \frac{\varepsilon_{330}lw}{h}; \\ d_{31}^2 = d_{310}^2(1 - 2jd_{31m}), \quad k_{31}^2 = k_{310}^2[1 + j(s_{11m} + \varepsilon_{33m} - 2d_{31m})]. \quad (4)$$

У випадку коливачь тонкого диска радіусом  $R$  і завтовшки  $h$  отримуємо наступні вирази для визначників [3–6]:

$$\begin{aligned}\Delta_r(x) &= xJ_0(x) - (1 - \nu)J_1(x), & \Delta_a(x) &= (1 - k_p^2)\Delta_r(x) + (1 + \nu)k_p^2J_1(x) \\ (x = kR, \quad k^2 &= \rho\omega^2s_{11}^E(1 - \nu^2))\end{aligned}\quad (5)$$

і для міжелектродної ємності  $C_d$  та п'єзомодуля  $d_{31}$

$$\begin{aligned}C_d &= C_{0d}(1 - j\varepsilon_{33m}), & x &= x_0(1 - 0,5js_{11m}), & C_{0d} &= \frac{\varepsilon_{330}\pi R^2}{h}; \\ d_{31}^2 &= d_{310}^2(1 - 2jd_{31m}), & k_p^2 &= k_{p0}^2[1 + j(s_{11m} + \varepsilon_{33m} - 2d_{31m})].\end{aligned}\quad (6)$$

Для зручності розрахунку в діапазоні частот ємнісна провідність записується через деякий множник  $a$  і безрозмірну частоту  $x$

$$\omega C_0 = \frac{2\pi f_{01}C_0x}{x_{01}} = ax, \quad a = \frac{2\pi f_{01}C_0}{x_{01}}, \quad (7)$$

де  $x$  — поточне значення безрозмірної комплексної частоти;  $x_{01}$  — активна складова резонансної безрозмірної частоти;  $f_{01}$  — виміряна частота максимуму, Гц, повної провідності.

Використовуючи вирази (1)–(7) і задаючи відомі або шукані величини КЕМЗ  $k_{310}^2$  або  $k_{p0}^2$  і тангенс втрат енергії  $s_{11m}$ ,  $\varepsilon_{33m}$ ,  $d_{31m}$ , можемо розрахувати повну провідність стержня чи диска на будь-якій частоті.

**Етапи ітераційного процесу з визначення КЕМЗ п'єзоелементів.** Суть ітераційної методології стосовно визначення коефіцієнтів електромеханічного зв'язку і втрат енергії при вимушених коливаннях п'єзокерамічних елементів конструкцій полягає в почерговому порівнянні виміряних в експерименті максимальної й мінімальної провідностей з розрахованими значеннями, які залежать від величини КЕМЗ і тангенсів втрат. Порівнюються також відношення частот цих провідностей, яке залежить лише від величини КЕМЗ.

Спершу п'єзокерамічний зразок приєднується до мосту змінного струму й вимірюється на частоті 1000 Гц його власна міжелектродна ємність  $C_0$  і тангенс діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon_{33m}$ .

Потім почергово в діапазоні частот в околі резонансу і антирезонансу вимірюються спади напруг на дослідному п'єзоелементі  $U_{pe}$ , на його резисторі навантаження  $U_R$  та на вході вимірювального кола  $U_{in}$ . Для цієї мети до відомої схеми пасивного чотириполюсника [1, 2, 11, 12] вводиться додатковий комутатор, який перемикає точку заземлення з резистора навантаження на п'єзоелемент і навпаки [3–6]. Відношення струму  $I_{pe}$  через п'єзоелемент до спаду потенціалу  $U_{pe}$  на ньому є (за означенням) повною електричною провідністю (адмітансом) п'єзоелемента  $Y_{pe}$ :

$$Y_{pe} = \frac{I_{pe}}{U_{pe}} = \frac{U_R}{RU_{pe}}. \quad (8)$$

За цією формулою будуються АЧХ повної провідності і за ними визначаються максимальне  $Y_m$  і мінімальне  $Y_n$  значення повної провідності.

За формулою (1) розраховується АЧХ повної провідності в частотному інтервалі біля основного резонансу.

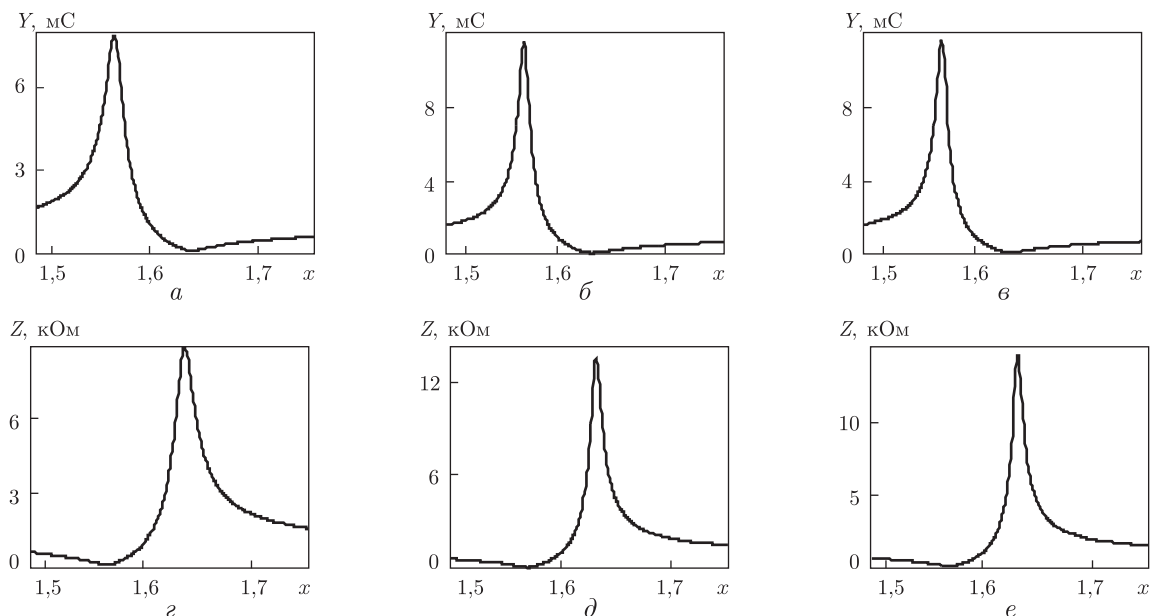


Рис. 1. Етапи ітераційного процесу для стержня  $33,4 \times 5,8 \times 1,25$  мм із п'єзокераміки ЦТБС- 3

Розглянемо приклад з ітераційного визначення поперечного КЕМЗ  $k_{31}$ , а також тангенсів механічних  $s_{11m}$  і п'єзоелектричних  $d_{31m}$  втрат енергії для основного поздовжнього резонансу стержня. Проведемо ітераційні кроки для зразка з розмірами  $33,4 \times 5,8 \times 1,25$  мм із п'єзокераміки ЦТБС – 3, який мав міжелектродну ємність  $C_0 = 2,98$  нФ;  $\text{tg } \delta = 0,0093$ ;  $Y_m = 11,6$  мС;  $Y_n = 0,0637$  мС ( $Z_n = 15,7$  кОм);  $f_m = 51,01$  кГц;  $f_n = 53,04$  кГц;  $f_n/f_m = 1,0398$ ;  $a = 0,608$  мС;  $x_{01} = 1,571$ , опір резистора навантаження  $229$  Ом.

Рис. 1 ілюструє ітераційні кроки: у верхньому ряду подані графіки повної провідності; нижньому — вхідного імпедансу. Графіки для кожного кроку подібні за формою й різняться лише положеннями мінімуму провідності (або максимуму імпедансу) по частоті та амплітудам максимумів і мінімумів.

В результаті першої ітерації, яку було проведено в інтервалі безрозмірних частот  $1,5 \leq x \leq 1,75$  при довільно вибраних величинах  $k_{310}^2 = 0,1$ ;  $s_{11m} = 0,01$ ;  $d_{31} = 0,01$  і експериментально визначених  $\varepsilon_{33m} = 0,0093$  і  $a = 0,608$  мС, отримано такі провідності  $Y_m = 7,8$  мС;  $Y_n = 0,112$  мС; і частоти:  $x_n = 1,64$ ;  $x_m = 1,571$ ;  $x_n/x_m = 1,0446$  (рис. 1, а). Треба зменшувати відношення  $x_n/x_m$ , а це можна зробити лише зниженням  $k_{310}^2$ , і підвищувати  $Y_m$ , для чого необхідно зменшувати  $s_{11m}$ .

Наступна ітерація проведена в тому ж частотному діапазоні при інших заданих величинах  $k_{310}^2 = 0,09$ ;  $s_{11m} = 0,006$ ;  $\varepsilon_{33m} = 0,0093$ ;  $d_{31m} = 0,007$ ;  $a = 0,608$  мС. Отримано:  $Y_m = 11,7$  мС;  $Y_n = 0,0735$  мС;  $x_n = 1,6321$ ;  $x_m = 1,571$ ;  $x_n/x_m = 1,0389$  (рис. 1, б). Максимум повної провідності й відношення частот наближаються до експериментальних значень, а для зменшення мінімуму провідності потрібно знижувати тангенс п'єзоелектричних втрат.

Остання (п'ята) ітерація проведена в тому ж частотному інтервалі при  $d_{31m} = 0,004$ . Отримано:  $Y_m = 11,7$  мС;  $Y_n = 0,0684$  мС;  $x_n = 1,6321$ ;  $x_m = 1,571$ ;  $x_n/x_m = 1,0389$  (рис. 1, в). Розбіжність з експериментом становить по  $Y_m$  — 0,86%, по  $Y_n$  — 7,4% і по  $f_n/f_m$  — 0,03%.

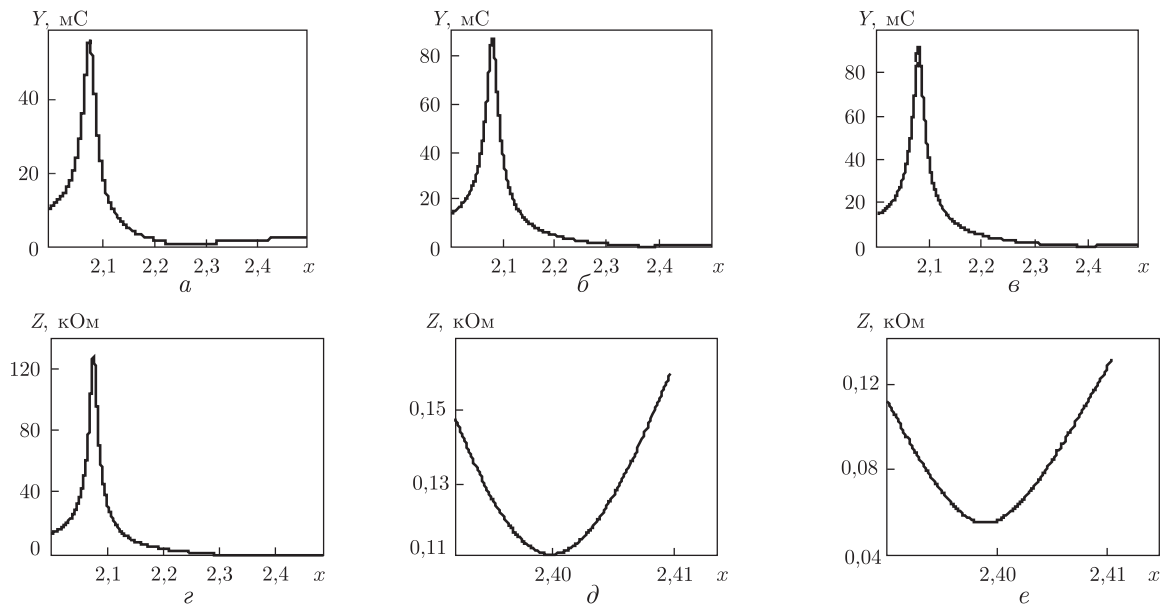


Рис. 2. АЧХ повної провідності в інтервалах безрозмірних частот 2–2,5 ( $a$ – $z$ ) та 2,39–2,41 ( $d$ ,  $e$ ), розраховані з різними наборами параметрів  $k_p^2$ ,  $s_{11m}$ ,  $d_{31m}$

Таким чином, в результаті ітераційних процедур можна вважати встановленими для досліджуваного стержня наступні дані:  $k_{310}^2 = 0,09$ ;  $s_{11m} = 0,006$ ;  $\varepsilon_{33m} = 0,0093$ ;  $d_{31m} = 0,004$ .

Рис. 2 демонструє ітераційні кроки при взятих із експерименту для диска ЦТБС-3  $66,4 \times 3,1$  мм наступних даних:  $C_0 = 18,49$  нФ,  $k_p^2 = 0,31$ ,  $\nu = 0,35$ ;  $\varepsilon_{33m} = 0,0085$ ;  $a = 1,77$  мС. Хоча у цьому випадку реактивна складова коефіцієнта Пуассона ігнорується, отримані результати дають можливість визначати наближено планарний КЕМЗ та показники втрат енергії.

За відношенням резонансних частот першої і другої радіальних мод визначають коефіцієнт Пуассона  $\nu$ , а за відношенням резонансної та антирезонансної частот першої радіальної моди — квадрат планарного КЕМЗ  $k_p^2$  [1–3]. За отриманими в такий спосіб даними, а також будь-якою близькою до діелектричних або механічних втрат величиною тангенса п'єзоелектричних втрат  $d_{31m}$  будують АЧХ повної провідності поблизу від частоти першого резонансу. Порівнюють відношення частот мінімальної провідності до максимальної з реально виміряним і в разі потреби вносять корекцію у величину  $k_p^2$ . Знову будують АЧХ і порівнюють максимум повної провідності з виміряним. В разі потреби вносять корекцію у величину механічних втрат  $s_{11m}$ . Після того, як максимум повної провідності і відношення частот наблизяться до виміряних експериментально величин, можна переходити до побудови АЧХ біля мінімальної провідності у збільшеному масштабі й до добору величини п'єзоелектричних втрат. Досвід показує, що для одержання несуперечливого результату часто буває достатньо трьох-чотирьох кроків. Зрозуміло, що для першого кроку можна взагалі взяти будь-які типові гіпотетичні величини.

Виберемо для першого кроку  $a = 1,77$  мС,  $\nu = 0,35$ ;  $\varepsilon_{33m} = 0,0085$ , решту покладемо такими:  $k_p^2 = 0,2$ ;  $s_{11m} = 0,01$ ;  $d_{31m} = 0,01$  (рис. 2,  $a$ ). Відношення частот в експерименті  $36,502/31,506 = 1,159$ , тоді як на графіку  $2,27/2,08 = 1,091$ . Треба збільшувати  $k_p^2$ . У ви-

падку  $k_p^2 = 0,3$  маємо графік рис. 2, б і відношення частот становить  $2,38/2,08 = 1,144$ , а у випадку  $k_p^2 = 0,32$  відношення частот —  $2,4/2,08 = 1,154$  (рис. 2, в). Максимум повної провідності становить 92 мС, що менше від виміряного значення 131 мС у 1,42 рази. Саме у стільки разів треба зменшити величину пружних втрат і взяти  $s_{11m} = 0,007$  (рис. 2, г). Тепер розраховані дані по максимуму повної провідності, так само як і по частоті мінімуму добре узгоджуються з експериментальними і можна братися за амплітуду мінімуму.

Розглянемо ділянку безрозмірних частот 2,3–2,5 (рис. 2, д). Мінімум повної провідності на цьому графіку дорівнює 0,11 мС. Виміряна величина при навантаженні 20 кОм була 0,0587 мС. Зменшення тангенса п'єзоелектричних втрат до 0,0035 знижує цей мінімум до 0,056 мС, а це вже добре узгоджується з експериментом (рис. 2, е).

Отже, для конкретного тонкого диска  $66,4 \times 3,1$  мм із п'єзокераміки ЦТБС-3 отримано уточнені значення, а саме:  $k_p^2 = 0,32$ ,  $s_{11m} = 0,007$ ,  $d_{31m} = 0,0035$ , які можуть бути використані при розрахунках коливань дискових резонаторів і п'єзотрансформаторів із розділеними електродами, а також перетворювачів кільцевої форми.

**Аналіз результатів.** Наведені в статті приклади ітераційного процесу для п'єзорезонаторів із поперечною поляризацією, коли напрямок коливань перпендикулярний до напрямку поляризації. В таких тілах резонанс пружної системи збігається із так званим електромеханічним резонансом [1]. Електромеханічний антирезонанс лежить вище по частоті від механічного резонансу. Ці п'єзорезонатори дістали в літературі назву п'єзом'яких [1, 8] (від англійського *unstiffened* — *нежорсткий, м'який*).

У випадку, коли напрямок електромеханічних коливань збігається з напрямком поля попередньої поляризації, електромеханічний антирезонанс збігається з резонансом пружної системи, тоді як електромеханічний резонанс лежить нижче по частоті від механічного резонансу. Такі п'єзорезонатори дістали в літературі назву п'єзожорстких [1, 8] (від англійського *stiffened* — *жорсткий, твердий, цупкий*).

Коливання п'єзожорстких резонаторів традиційно характеризуються не повною провідністю (адмітансом), а вхідним опором (імпедансом). Аналіз відомих виразів для імпедансу п'єзожорстких резонаторів [1] показав, що всі вони також зводяться до єдиної формули

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \frac{\Delta_{r*}}{\Delta_{a*}}, \quad (9)$$

котра є оберненою до формули (1). Це означає, що вхідний імпеданс п'єзожорстких резонаторів є добутком реактивного імпедансу їх статичної ємності на відношення резонансного і антирезонансного визначників.

У випадку поздовжніх коливань стержня з поздовжньою поляризацією завдовжки  $l$ , завширшки  $w$  і завтовшки  $h$  можемо записати аналогічно до формули (2.27) в монографії [1]:

$$\Delta_{a*}(x) = \cos(x), \quad \Delta_{r*}(x) = (1 + k_D^2)\Delta_{a*}(x) - k_D^2 \frac{\sin x}{x} \quad (10)$$

$$\left( x = \frac{kl}{2}, \quad k^2 = \rho\omega^2 s_{33}^D, \quad k_D^2 = \frac{k_{33}^2}{1 - k_{33}^2} \right).$$

Ітераційна процедура для визначення поздовжнього КЕМЗ  $k_{33}$  і товщинного КЕМЗ  $k_t$ , а також відповідних тангенсів втрат, аналогічна до викладеної вище й полягає в порівнянні відношень частот і максимальних та мінімальних імпедансів або адмітансів.

Запропонована авторами нова розрахунково-експериментальна методологія по ітераційному визначенню коефіцієнтів електромеханічного зв'язку і втрат енергії показала свою

ефективність. Питання розділення експериментально виміряних за величиною добротності втрат енергії залишається відкритим і вимагає нових досліджень.

## Цитована література

1. *Шульга Н. А., Болжисев А. М.* Колебания пьезоэлектрических тел. – Киев: Наук. думка, 1990. – 228 с.
2. *Шульга М. О., Карлаш В. Л.* Резонансні електро механічні коливання п'єзоелектричних пластин. – Київ: Наук. думка, 2008. – 272 с.
3. *Карлаш В. Л.* Методи визначення коефіцієнтів зв'язку і втрат енергії при коливаннях резонаторів із п'єзокераміки // Акустичний вісн. – 2012. – **15**, № 4. – С. 24–38.
4. *Шульга М. О., Карлаш В. Л.* Амплітудно-фазові характеристики радіальних коливань тонкого п'єзокерамічного диска біля резонансів // Доп. НАН України. – 2013. – № 9. – С. 80–86.
5. *Безверхий О., Зінчук Л., Карлаш В.* Вплив режиму електричного навантаження, сталих напруги або струму на характеристики коливань п'єзокерамічних резонаторів // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. – 2013. – Вип. 18. – С. 9–20.
6. *Karlash V. L.* Energy losses in piezoceramic resonators and its influence on vibrations' characteristics // Electronics and communication. – 2014. – **19**, No 2. – P. 82–94.
7. *Karlash V. L.* Modeling of energy-loss piezoceramic resonators by electric equivalent networks with passive elements // Mathematical modeling and computing. – 2014. – **1**, No 2. – P. 163–177.
8. *G. Liu et al.* Losses in ferroelectric materials // Material Science and Engineering R Reports. – 2015. – **89**. – P. 1–48.
9. *Uchino K., Zhuang Yu., Ural S. O.* Loss determination methodology for a piezoelectric ceramic: new phenomenological theory and experimental proposals // J. Adv. Dielectric. – 2011. – **1**, No 1. – P. 17–31.
10. *Holland R., Eer Nisse E. P.* Design of resonant piezoelectric devices. – Cambridge and London: M. I. T. Press, 1969. – 256 p.
11. *ГОСТ 12370–72.* Материалы пьезокерамические, методы испытаний. – Москва: Изд-во стандартов, 1973. – 28 с.
12. *IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Measurements of Piezoelectric Ceramics* // Proc. IRE. – 1961. – **49**. – P. 1161–1169.

## References

1. *Shulga N. A., Bolkisev A. M.* The Vibrations of Piezoelectric Bodies, Kiev: Nauk. Dumka, 1990 (in Russian).
2. *Shulga M. O., Karlash V. L.* Resonant electromechanic vibrations of piezoelectric plates, Kiev: Nauk. Dumka, 2008 (in Ukrainian).
3. *Karlash V. L.* Acoustic bulletin, 2012, **15**, No 4: 24–38 (in Ukrainian).
4. *Shulga M. O., Karlash V. L.* Dop. NAN Ukraine, 2013, No 9: 80–86 (in Ukrainian).
5. *Bezverkhyy A., Zinchuk L., Karlash V.* Physico-mathematical modeling and information technologies, 2013, Iss. 18: 9–20 (in Ukrainian).
6. *Karlash V. L.* Electronics and communication, 2014, **19**, No 2: 82–94.
7. *Karlash V. L.* Mathematical modeling and computing, 2014, **1**, No 2: 163–177.
8. *Liu G. et al.* Material Science and Engineering R Reports, 2015, **89**:1–48.
9. *Uchino K., Zhuang Yu., Ural S. O.* J. Adv. Dielectric, 2011, **1**, No 1: 17–31.
10. *Holland R., Eer Nisse E. P.* Design of resonant piezoelectric devices, Cambridge and London: M.I.T. Press, 1969.
11. *GOST 12370-72.* Piezoceramic materials, test methods. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1973 (in Russian).
12. *IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Measurements of Piezoelectric Ceramics.* Proc. IRE, 1961, **49**: 1161–1169.

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

Надійшло до редакції 08.06.2013

А. И. Безверхий, Л. П. Зинчук, В. Л. Карлаш

## Основы итерационной методологии уточненного определения коэффициентов электромеханической связи в пьезокерамических резонаторах

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

*На примере известных задач о продольных колебаниях тонкого пьезокерамического стержня с поперечной поляризацией и радиальных колебаниях тонкой круглой пьезокерамической пластины со сплошными электродами излагаются основы новой расчетно-экспериментальной итерационной методологии, которая дает возможность определять с высокой точностью коэффициенты электромеханической связи и параметры потерь энергии.*

**Ключевые слова:** пьезокерамический стержневой резонатор, расчетно-экспериментальная итерационная методология, показатели потерь энергии.

O. I. Bezverkhyi, L. P. Zinchuk, V. L. Karlash

## A base of the iterative methodology for a refined determination of electromechanical coupling factors in piezoceramic resonators

S. P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine, Kiev

*The grounds of a new computational-experimental iterative methodology that makes it possible to determine electromechanical coupling coefficients and parameters of the energy loss with high precision are described by the example of famous problems of the longitudinal vibrations of a thin piezoceramic rod with transverse polarization and radial oscillations of a thin circular piezoceramic plate with unbroken electrodes.*

**Keywords:** piezoceramic bar resonator, computational-experimental iterative methodology, loss energy factors.