

5. *Бутенко В.И.* Электронно-дислокационная теория контактного взаимодействия поверхностей твердых тел. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 208 с.
6. *Бутенко В.И.* Контактное взаимодействие материалов при трении и резании. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 245 с.

**Бутенко Виктор Иванович**

Технологический институт Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: mkk@egf.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634376122.

**Дуров Дмитрий Сергеевич**

**Захарченко Анатолий Данилович**

**Шаповалов Роман Григорьевич**

**Гусакова Лиана Валерьевна**

**Подножкина Валентина Николаевна**

**Фоменко Елена Сергеевна**

**Рыбинская Татьяна Анатольевна**

**Диденко Дмитрий Иванович**

**Butenko Victor Ivanovich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: mkk@egf.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634376122.

**Durov Dmitry Sergeyevich**

**Zakharchenko Anatoly Danilovich**

**Shapovalov Roman Grigoryevich**

**Gusakova Liana Valeryevna**

**Podnozhkina Valentina Nikolayevna**

**Fomenko Yelena Sergeevna**

**Rybinskaya Tatyana Anatolyevna**

**Didenko Dmitry Ivanovich**

УДК 621.315

**В.Л. Земляков**

**ПРОСТОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЬЕЗОМОДУЛЯ**

*Приведены соотношения, позволяющие сформулировать простой метод определения пьезомодуля в динамическом режиме. Основу метода составляют измерения модуля проводимости ПКЭ только в области его механического резонанса.*

*Пьезомодуль; пьезокерамический элемент; эквивалентная схема.*

V.L. Zemlyakov

## THE SIMPLE METHOD OF PIEZO MODULE DETERMINATION

*The relations permitting to formulate the simple method of piezomodule determination in dynamic mode are derived. The method is based on the piezoceramic element conductivity module measurement only in the range of mechanical resonance.*

*Piezomodule; piezoceramic element; equivalent circuit.*

Для определения пьезомодуля чаще всего применяют регламентированный стандартом [1] метод «резонанса–антирезонанса», основанный на решении электромеханической задачи [2]. Несомненным достоинством этого метода является простота его аппаратной реализации, поскольку для измерения модуля проводимости пьезокерамического элемента (ПКЭ) достаточно последовательно соединить его с резистором  $R_0$  и применить распространенные измерительные приборы: генератор, частотомер, вольтметр. По измеренной частотной зависимости модуля проводимости ПКЭ определяют частоту механического резонанса  $\omega_p$  и частоту электромеханического резонанса (антирезонанса)  $\omega_a$ .

Следует однако отметить, что процедура первичных измерений, необходимая для получения исходных данных для определения пьезомодуля, достаточно трудоемкая. Необходимо провести измерения в трех частотных областях: в области резонанса (определяется  $\omega_p$ ), в области антирезонанса (определяется  $\omega_a$ ) и на низкой частоте 1 кГц (определяется емкость ПКЭ  $C^T$ ). Причем, для четкой локализации резонансов, в силу их существенного различия, необходимо подбирать величину сопротивления резистора  $R_0$  отдельно для измерений в области резонанса и области антирезонанса. Пьезомодуль связан с измеренными значениями  $C^T$ ,  $\omega_p$  и  $\omega_a$  определенной математической зависимостью.

Пьезомодуль можно определить и так называемым GBW-методом [3], также основанным на решении электромеханической задачи. Необходимая для его реализации процедура первичных измерений существенно проще, поскольку все измерения проводятся только в области резонанса. Однако его аппаратная реализация сложнее, чем у предыдущего метода, и требует измерения активной составляющей проводимости, что невозможно без фазовых измерений. Пьезомодуль связан определенной математической зависимостью с измеренным значением активной составляющей проводимости на частоте резонанса и шириной резонансной кривой активной составляющей проводимости  $\Delta\omega$  на уровне 0,5 от максимального значения.

Представляет практический интерес метод определения пьезомодуля, который сочетал бы в себе достоинства рассмотренных выше методов и требовал для своей реализации измерений модуля проводимости ПКЭ только в области резонанса.

Для обоснования такого метода воспользуемся представлением ПКЭ в виде эквивалентной электрической схемы [2], представляющей собой емкость  $C_0$ , параллельно которой подключена цепочка из последовательно включенных элементов  $C$ ,  $L$  и  $R$ , характеризующая динамические свойства ПКЭ. Поэтому емкость  $C$ , индуктивность  $L$  и сопротивление  $R$  называют динамическими. Емкость ПКЭ на низкой частоте  $C^T = C_0 + C$ . Частоты резонанса и антирезонанса определяются формулами:

$$\omega_p^2 = \frac{1}{LC}, \quad \omega_a^2 = \frac{1}{L} \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{C_0} \right).$$

Для оценки ПКЭ используют также такие параметры, как эффективный коэффициент электромеханической связи  $k_e^2$  и фактор качества  $M$ :

$$k_e^2 = \frac{C}{C_0 + C} = \frac{1}{r_c + 1} = \frac{\omega_a^2 - \omega_p^2}{\omega_a^2}, \quad M = \frac{1}{\omega_p RC_0} = \frac{Q_M}{r_c},$$

где  $r_c = C_0/C$  – емкостное отношение,  $Q_M = (\omega_p RC)^{-1}$  – механическая добротность ПКЭ, которую можно определить по формуле

$$Q_M = \omega_p / \Delta\omega. \quad (1)$$

Проводимость ПКЭ на произвольной частоте может быть представлена в виде суммы активной и реактивной составляющих:  $Y(\omega) = G(\omega) + jB(\omega)$ , где активная  $G(\omega)$  и реактивная  $B(\omega)$  составляющие, которые определяются по формулам [2]:

$$G(\omega) = \frac{R}{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} = \frac{1}{R(1 + v^2(\omega)Q_M^2)},$$

$$B(\omega) = \omega C_0 - \frac{\omega L - 1/\omega C}{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} = \omega C_0 - \frac{v(\omega)Q_M}{R(1 + v^2(\omega)Q_M^2)},$$

где  $v(\omega) = \omega/\omega_p - \omega_p/\omega$ .

Используя последние соотношения для квадрата модуля проводимости, можно записать

$$|Y(\omega)|^2 = \frac{1}{R} G(\omega) \left[ 1 + \frac{\omega^2}{\omega_p^2} \frac{1 + v^2 Q_M^2}{M^2} - 2 \frac{\omega}{\omega_p} \frac{v Q_M}{M} \right].$$

Поскольку ПКЭ, выполненные из стандартных пьезоматериалов [1], имеют величину  $M > 10$ , то для них в области механического резонанса частотные зависимости  $G(\omega)$  и  $|Y(\omega)|^2$  примерно совпадают.

То есть для определения добротности ПКЭ можно использовать не только ширину резонансной кривой активной составляющей проводимости на уровне 0,5, но и результаты измерений ширины резонансной кривой модуля проводимости  $\Delta\omega_Y$ , на уровне 0,7 от максимального значения:

$$Q_M = \omega_p / \Delta\omega_Y, \quad (2)$$

как и допускается в [1].

На рис. 1 представлена зависимость относительной погрешности определения добротности  $\delta\%$  по ширине резонансной кривой  $\Delta\omega_Y$  от величины самой добротности  $Q_M$ , найденной по формуле (1): линия 1 –  $k_e = 0,45$ , линия 2 –  $k_e = 0,3$ .

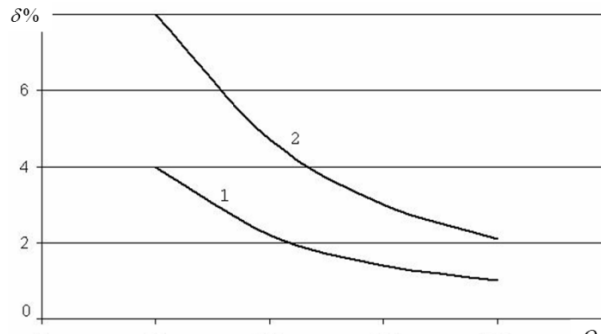


Рис. 1. Относительная погрешность определения добротности

Воспользуемся далее новым подходом к определению пьезомодуля, в соответствии с которым он связан определенной зависимостью с емкостью динамической ветви эквивалентной электрической схемы [4]:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} C,$$

где константа  $\beta_{ij}$  определяется размерами ПКЭ и его упругой податливостью.

Например, для ПКЭ в виде стержня длиной  $l$ , шириной  $W$  и высотой  $t$  с упругой податливостью  $S_{11}^E$ :

$$\beta_{31}^c = \frac{\pi^2}{8} \frac{t}{wl} S_{11}^E.$$

То есть любой метод определения динамической емкости является методом определения пьезомодуля.

Из такого подхода автоматически следуют аналоги рассмотренных ранее GBW-метода и метода «резонанса–антирезонанса», поскольку

$$C = 1/(\omega_p R Q_m) = \Delta\omega/(\omega_p^2 R), \quad C = C^T (\omega_a^2 - \omega_p^2) / \omega_a^2.$$

В частности, аналог метода «резонанса–антирезонанса» опирается на формулу

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} C^T \left( \frac{\omega_a^2 - \omega_p^2}{\omega_a^2} \right). \quad (3)$$

Учитывая (2), можно записать

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} |Y_m| \frac{\Delta\omega_Y}{\omega_p^2}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что для определения пьезомодуля на образцах ПКЭ известных размеров достаточно провести измерения частотной зависимости модуля проводимости в области резонанса, по этой частотной зависимости определить частоту резонанса, соответствующую максимальному значению модуля проводимости  $|Y_m|$  и измерить ширину резонансной кривой модуля проводимости  $\Delta\omega_Y$  на уровне 0,7 от максимального значения.

Экспериментальные исследования были проведены для образца ПКЭ из материала ЦТБС-3 в виде стержня с размерами  $l = 34$  мм,  $W = 7$  мм и  $t = 6$  мм. Погрешности измерений не превышали значений, рекомендуемых стандартом [1].

В табл. 1 представлены результаты первичных измерений и значения пьезомодуля, полученные тремя методами:

$d_{31}$  – пьезомодуль; получен традиционным методом «резонанса–антирезонанса» [2],

$d_{31}^a$  – пьезомодуль; получен аналогом метода «резонанса–антирезонанса»: первичные измерения те же – частота резонанса  $\omega_p$ , частота антирезонанса  $\omega_a$  и емкость ПКЭ на низкой частоте  $C^T$ , а алгоритм обработки этих измерений опирается на формулу (3),

$d_{31}^Y$  – пьезомодуль; получен методом, опирающимся на формулу (4).

Таблица 1

$C^T$ , нФ	$f_p$ , кГц	$f_a$ , кГц	$\Delta f_y$ , Гц	$R$ , Ом	$d_{31} \times 10^{-12}$ , к/н	$d_{31}^a \times 10^{-12}$ , к/н	$d_{31}^Y \times 10^{-12}$ , к/н
645	52,96	54,74	433	636	144	143	140

Наблюдается хорошее совпадение значений пьезомодуля, полученных разными методами, в том числе и методом, основанным на измерении модуля проводимости ПКЭ в области резонанса и определении ширины резонансной кривой на уровне 0,7 от максимального значения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. – М.: Электростандарт, 1987.
2. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / Под ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
3. *Hollang R., Eernisse E.* Accurate measurement of coefficient in ferroelectric ceramic. – IEEE transact. On sonics and ultrasonics. 1969. v. SU–16. № 4. – P. 173-181.
4. *Земляков В.В., Земляков В.Л.* Новый подход к измерению пьезомодуля пьезокерамических материалов в динамическом режиме // Измерительная техника. 2002. №4. – С. 52-55.

**Земляков Виктор Леонидович**

Южный федеральный университет.

E-mail: decanat@fvt.sfedu.ru.

344090, г. Ростов н/Д, ул. Мильчакова, 10.

Тел.: 88632696992; 88632434811; 88632212866.

**Zemlyakov Victor Leonidovich**

South Federal University.

E-mail: decanat@fvt.sfedu.ru.

10, Milchakova street, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

Phone: 88632696992; 88632434811; 88632212866.