

В. Л. ЗЕМЛЯКОВ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Показана возможность контроля пьезомодуля по результатам частотных измерений в области механического резонанса пьезокерамических элементов. Приведены расчетные соотношения и результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: пьезокерамический элемент, коэффициент электромеханической связи, пьезомодуль, частотная характеристика проводимости, эквивалентная электрическая схема.

Введение. Пьезокерамические элементы (ПКЭ) — тела простой геометрической формы, изготовленные из пьезокерамик, используются в изделиях приборостроения. Поэтому представляет интерес создание автоматизированных средств измерений, обеспечивающих эффективный контроль качества ПКЭ в процессе производства, недорогих, отличающихся быстродействием и информативностью.

В настоящее время контроль качества пьезокерамического материала и ПКЭ в целом в процессе производства проводится либо по величине коэффициента электромеханической связи k_{ij} , либо по величине коэффициента пьезомодуля d_{ij} . Указанные значения определяются по частотам резонанса ω_p и антирезонанса ω_a , полученным при измерении модуля проводимости ПКЭ (метод „резонанса—антирезонанса“) [1, 2].

Поскольку проводимость ПКЭ на частоте резонанса и антирезонанса существенно различается, для определения их параметров требуются измерения в области резонанса и антирезонанса. Это усложняет средства измерений и увеличивает время контроля качества ПКЭ. ПКЭ является эффективным фильтром, подавляющим частоту антирезонанса, поэтому ее измерение представляет определенные трудности. При этом влияние гармоник в спектре задающего генератора может привести к увеличению погрешности измерений. Дополнительные трудности при измерении частоты антирезонанса возникают для ПКЭ с малой электрической емкостью. Необходимо прилагать усилия для компенсации „паразитной“ емкости соединительных проводов и держателя образца.

Поэтому возможность контроля качества ПКЭ в процессе их производства по измерениям только в области механического резонанса позволила бы избавиться от перечисленных проблем.

Определение параметров пьезомодуля по результатам измерений в области резонанса. Для получения необходимых соотношений рассмотрим ПКЭ в виде стержня с поперечной модой колебаний CH_t по классификации, приведенной в [1]:

$$\frac{k_{31}^2}{1-k_{31}^2} = \frac{\pi}{2} \frac{\omega_a}{\omega_p} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{\omega_a - \omega_p}{\omega_p} \right), \quad k_{31}^2 = \frac{\pi^2}{8} \frac{\omega_a^2 - \omega_p^2}{\omega_a^2}, \quad (1)$$

$$d_{31} = k_{31} (\varepsilon_{33}^T S_{11}^E)^{1/2},$$

где S_{11}^E — компонента тензора упругой податливости, ε_{33}^T — диэлектрическая проницаемость пьезокерамического материала, определяемая по емкости C^T , которую ПКЭ имеет на низкой частоте (100 Гц):

$$\varepsilon_{33}^T = \frac{t}{lw} C^T, \quad (2)$$

l, t, w — соответственно длина, высота и ширина стержня: $l \gg t, w$.

Для оценки свойств ПКЭ широко применяется его эквивалентная электрическая схема [1], содержащая электрическую емкость C_0 , параллельно которой подключена резонансная цепь RLC , отражающая динамические свойства механической колебательной системы, поэтому емкость C индуктивность L и сопротивление R называют динамическими. Емкость ПКЭ на низкой частоте $C^T = C_0 + C$.

Одним из параметров, характеризующих ПКЭ в его эквивалентной схеме, является эффективный коэффициент электромеханической связи k_e [1]:

$$k_e^2 = \frac{C}{C^T} = \frac{\omega_a^2 - \omega_p^2}{\omega_a^2}. \quad (3)$$

Подстановка (2) и (3) в (1) дает:

$$d_{31}^2 = \frac{\pi^2}{8} \frac{t}{lw} S_{11}^E C = \beta_{31} C. \quad (4)$$

Соотношение, аналогичное (4), можно получить для ПКЭ другой геометрии и других мод колебаний. Изменяется только коэффициент β . Поэтому в последующих формулах вместо конкретных обозначений будем использовать общие индексы ij .

Согласно формуле (4), любой метод определения динамической емкости эквивалентной электрической схемы одновременно является и методом определения коэффициентов пьезомодуля материала ПКЭ. Это создает предпосылки для разработки новых методов определения коэффициентов, в том числе и методов, основанных на измерениях только в области механического резонанса ПКЭ.

Приведем примеры. Добротность ПКЭ Q_M определяется известными формулами [1, 2]:

$$Q_M = \frac{1}{\omega_p RC} = \frac{\omega_p}{\Delta\omega} = \frac{\omega_p}{\Delta\omega_Y},$$

где $\Delta\omega$ — ширина резонансной кривой активной составляющей проводимости на уровне 0,5, $\Delta\omega_Y$ — ширина резонансной кривой модуля проводимости на уровне 0,7, а динамическое сопротивление R определяется по максимальному значению активной составляющей проводимости на частоте резонанса, тогда

$$C = \frac{1}{\omega_p R Q_M} = \frac{\Delta\omega}{\omega_p^2 R} = \frac{\Delta\omega_Y}{\omega_p^2}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), свойства пьезомодуля можно определить по измерениям только в области механического резонанса ПКЭ:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \frac{\Delta\omega}{\omega_p^2 R}, \quad (6)$$

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \frac{\Delta\omega_Y}{\omega_p^2 R}. \quad (7)$$

Последние соотношения позволяют сформулировать метод определения коэффициентов пьезомодуля, при котором в ПКЭ известных геометрических размеров возбуждают

одномерные линейные моды колебаний путем воздействия на него электрическим синусоидальным напряжением с переменной частотой, измеряют частоту механического резонанса ω_p и сопротивление R на этой частоте, а также измеряют ширину резонансной кривой для активной составляющей проводимости $G(\omega)$ на уровне $0,5 \Delta\omega$ или ширину резонансной кривой модуля проводимости в области механического резонанса на уровне $0,7 \Delta\omega$, а пьезомодуль определяют по формулам (5) или (6).

Другой возможный метод определения коэффициентов пьезомодуля по измерениям только в области резонанса заключается в определении площади под кривой активной составляющей проводимости, т.е. интеграла вида

$$I = \int_0^{\infty} G(\omega) d\omega.$$

Действительно, поскольку активная составляющая проводимости $G(\omega)$ определяется соотношением [1]

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

можно показать, что $I = \pi/2L$, тогда

$$C = \frac{2}{\pi} \frac{I}{\omega_p^2}, \quad d_{ij}^2 = \frac{2}{\pi} \beta_{ij} \int_0^{\infty} \frac{G(\omega)}{\omega_p^2} d\omega. \quad (8)$$

Приведем пример реализации метода. К выходу генератора качающейся частоты (ГКЧ) подключают последовательно соединенные ПКЭ и вспомогательный резистор R_v с сопротивлением, значительно меньшим сопротивления ПКЭ на частоте резонанса, как это обычно делается при исследовании частотных характеристик проводимости [1, 2]. Параллельно вспомогательному резистору подключают синхронный детектор (один вход синхронного детектора подключен к вспомогательному резистору, а другой — к выходу ГКЧ), затем — интегратор.

В зависимости от величины добротности ПКЭ устанавливают время качания частоты и включают ГКЧ, который начинает формировать на выходе синусоидальный сигнал с линейно изменяющейся частотой. Одновременно линейно нарастающее (пилообразное) напряжение, используемое для работы ГКЧ, включает интегратор. На выходе синхронного детектора формируется частотная характеристика активной составляющей проводимости. К моменту завершения сканирования частоты на выходе интегратора появляется постоянный сигнал, пропорциональный интегралу от активной составляющей, зависящей от частоты по заданному диапазону (соответствующий площади под кривой активной составляющей проводимости). Этот сигнал можно использовать непосредственно для управления процессом разбраковки ПКЭ при их производстве.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальное сравнение методов определения коэффициентов пьезомодуля проводилось по результатам измерений частотных характеристик модуля и активной составляющей проводимости. Погрешности измерений не превышали значений, регламентированных ОСТ [2].

Измерения проводились на четырех образцах ПКЭ, размеры которых представлены в табл. 1. В табл. 2 и 3 приведены полученные результаты (номер строки соответствует номеру элемента в табл. 1).

Данные табл. 2 относятся к методу определения коэффициентов по измерениям емкости на низкой частоте, а также частоты резонанса и антирезонанса. Данные табл. 3 относятся к

методу определения пьезомодуля по измерениям только в области резонанса. Первые три столбца таблиц соответствуют экспериментальным данным, остальные — результаты расчетов.

Таблица 1

Размеры образцов ПКЭ

№	l , мм	w , мм	t , мм
1	90	8	9
2	34	7	6
3	11	4	4,5
4	11	4	4,5

Таблица 2

Результаты первичных измерений и расчетов по методу „резонанса—антирезонанса“

C^T , пФ	f_p , кГц	f_a , кГц	k_{31}	ϵ_{33}^T , 10^{-9} Ф/м	S_{11}^E , 10^{-13} м ² /Н	d_{31} , 10^{-12} К/Н
1185	16,91	17,64	0,31	14,8	144	142
675	52,75	54,65	0,29	17	104	121
89	127,65	133,76	0,34	10,2	166	130
107	128,02	136,59	0,39	10,9	168	167

Таблица 3

Результаты первичных измерений и расчетов по предложенному методу

f_p , кГц	Δf , кГц	R , Ом	S_{11}^E , 10^{-13} м ² /Н	d_{31} , 10^{-12} К/Н
16,91	0,117	670	144	146
52,75	0,074	93	104	124
127,65	1,618	1887	168	133
128,02	1,512	1042	166	172

Анализ данных табл. 2 и 3 позволяет сделать вывод о том, что предложенный метод, обладая той же информативностью, что и традиционный, имеет несомненное преимущество, заключающееся в более простой процедуре первичных измерений.

Контроль пьезомодуля в партии однотипных ПКЭ через площадь под кривой активной составляющей проводимости проводился на образцах в виде стержня при $l=11$, $w=4$, $t=4,5$ мм. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов пьезомодулей

№	f_p , кГц	d_{31} , 10^{-12} К/Н	d_{31} , %	d_{31} , %, $G(\omega)$
1	127,86	173	100	100
2	128,06	158	91	88
3	128,12	147	85	82
4	127,91	125	72	70
5	128,20	142	82	79
6	128,06	167	96	94
7	128,10	172	99	98
8	128,15	158	91	88
9	127,96	134	77	75
10	127,88	145	84	81

За 100 % принято значение d_{31} первого ПКЭ. В третьем и четвертом столбцах приведены абсолютное и относительное значения коэффициента пьезомодуля, измеренные методом „резонанса—антирезонанса“. Пятый столбец — относительные значения, полученные с использованием предложенного метода.

Данные табл. 4 иллюстрируют хорошее совпадение значений коэффициента пьезомодуля в относительных единицах, полученных по методу „резонанса—антирезонанса“ и через площадь под кривой активной составляющей проводимости ПКЭ.

Заключение. Поскольку емкость динамической ветви эквивалентной электрической схемы ПКЭ однозначно определяет материал пьезомодуля, это благодаря аппарату теории линейных электрических цепей позволяет существенно расширить возможности технической диагностики ПКЭ и разрабатывать новые методы с простой процедурой первичных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / Под ред. С. И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 356 с.
2. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. М.: Электростандарт, 1987.

Сведения об авторе

Виктор Леонидович Земляков — канд. техн. наук, доцент; Южный федеральный университет, кафедра информационных и измерительных технологий, Ростов-на-Дону;
E-mail: decanat@fvt.sfedu.ru

Рекомендована кафедрой
информационных и измерительных технологий

Поступила в редакцию
29.01.10 г.