621.315

Определение добротности пьезорезонаторов

В. Л. ЗЕМЛЯКОВ, С. Н. КЛЮЧНИКОВ

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: vlzeml@mail.ru

Предложен новый метод определения добротности пьезорезонаторов по измерениям только на одной частоте. Он реализуется в устройствах без элементов памяти и позволяет автоматически сразу после измерений формировать на выходе электрический сигнал, соответствующий добротности.

Ключевые слова: *пьезорезонатор, добротность, автоматизированное устройство.*

The new method of Q-factor of piezoresonators determination based on single frequency measurements is offered. It is implemented in devices without memory elements and allows to form automatically right after the measurements the output electrical signal corresponding to Q-factor.

Key words: *piezorezonator, Q-factor, automated device.*

Одна из важных задач, решаемых в пьезоэлектрическом приборостроении, — выпуск идентичных по параметрам и качественных пьезокерамических элементов (ПКЭ). Они широко применяются в качестве пьезорезонаторов, представляющих собой механическую колебательную систему с ярко выраженными резонансными свойствами.

Добротность пьезорезонаторов вычисляют по результатам измерений частотной характеристики (ЧХ) модуля, активной или реактивной составляющих проводимости в области резонанса [1]. Такой способ нахождения добротности связан с тем, что ПКЭ в области резонанса заменяется эквивалентной электрической схемой [2], в которой емкость C_0 включена параллельно цепочке из последовательно соединенных емкости C, индуктивности L и сопротивления R, характеризующих динамические свойства ПКЭ.

Например, ЧХ активной составляющей проводимости ПКЭ выражают формулой

$$G(\omega) = R \Big/ \left[R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2\right] = \left[R(1 + \nu^2(\omega) Q_м^2\right]^{-1}, \qquad (1)$$

где $\nu(\omega) = \omega/\omega_р - \omega_р/\omega$; $Q_м = \omega_р L/R = (\omega_р RC)^{-1}$ — механическая добротность; $\omega_р = 1/\sqrt{LC}$ — частота механического резонанса ПКЭ, соответствующая максимуму ЧХ.

В настоящее время не существует метода определения добротности пьезорезонаторов по результатам измерений каких-либо величин на одной частоте, который позволял бы сразу после измерений «одномоментно» получать электрический сигнал, соответствующий добротности. Разработка такого метода представляет практический интерес, поскольку дает возможность повысить производительность контроля пьезорезонаторов и автоматизировать их разбраковку при массовом производстве. Метод можно реализовать на основе измерения активной составляющей проводимости в развитие метода, описанного в [3].

Приведем исходные данные. Общепринятый метод определения добротности пьезорезонатора по активной составляющей проводимости описан, например, в [1] и заключается в том, что находят частоту резонанса $\omega_р$ и ширину резонансной кривой $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ на уровне 0,5 максимального значения (см. рис. 1 в [3]) и добротность рассчитывают по формуле $Q_м = \omega_р/\Delta\omega$. Добротность также можно определить, применив метод, аналогичный предложенному в [4], где проводят дифференцирование амплитудно-частотной характеристики по частоте и находят частоты максимума ω_{max} и минимума ω_{min} производной.

Поскольку график активной составляющей проводимости имеет точку перегиба на частоте ω_{max}, выполним некоторые преобразования с учетом (1). Введем обозначение $(\omega - \omega_р)/(\omega_1 - \omega_р) = x$. Возьмем вторую производную от функции вида $(1 + x^2)^{-1}$ и приравняем ее к нулю. В результате получим

$$(-2 + 6x^2) / (1 + x^2)^3 = 0.$$

Отсюда находим, что $x = 1/\sqrt{3}$ и, следовательно,

$$\left(\omega_{max} - \omega_р\right) \Big/ \left(\omega_1 - \omega_р\right) = 1/\sqrt{3}. \qquad (2)$$

Описанные методы реализуют только в устройствах с элементами памяти, поскольку для расчета добротности необходимы результаты измерений на разных частотах.

Еще один метод определения добротности с использованием дифференцирования активной составляющей проводимости по частоте описан в [3]. Продифференцировав (1) и использовав (2), в итоге получим

$$Q_м = 0{,}77\omega_р G'(\omega_{max})/G(\omega_р). \qquad (3)$$

Как следует из (3), значение механической добротности можно определить только по амплитудным измерениям: максимальным значениям активной составляющей проводимости и ее производной.

Сформулируем метод определения добротности по результатам измерений на одной частоте. Это возможно, если

известна зависимость между активной составляющей проводимости на частоте резонанса и проводимостью на частоте максимума производной.

Активная составляющая проводимости на частоте максимума ее производной выражается как

$$G(\omega_{max}) = 3G(\omega_p)/4.$$

Оценим относительную погрешность, возникающую при замене в (3) частоты резонанса на частоту максимума производной от активной составляющей проводимости. Использовав (2), запишем

$$\left(\omega_{max} - \omega_p\right) \Big/ \omega_p = \left(Q_м \sqrt{3}\right)^{-1}.$$

С учетом высокой добротности пьезорезонаторов, изготовленных из стандартных пьезоматериалов, возникающая погрешность не будет превышать 1 %. Тогда (3) примет вид

$$Q_м = 0{,}58\omega_{max}\, G'(\omega_{max}) / G(\omega_{max}). \qquad (4)$$

На рис. 1 приведена зависимость отношения производной проводимости к ее активной составляющей от частоты $f = 2\pi/\omega$, полученная в результате компьютерного моделирования для эквивалентной электрической схемы с параметрами C_0 = 10 нФ, C = 1 нФ, L = 1 мГн, R = 5 Ом, $Q_м$ = 200. Максимум отношения G'/G = 0,00225 Гц$^{-1}$ и наблюдается на частоте f_{max} = 158,8 кГц, а добротность $Q_м$ = = 0,58 · 158800 · 0,00225 = 207, что соответствует относительной погрешности 3,5%.

С учетом (4) метод определения добротности можно сформулировать следующим образом. Колебания пьезорезонатора в области резонанса возбуждают воздействием на него электрического синусоидального напряжения с переменной частотой с одновременным выделением активной составляющей проводимости и ее дифференцированием; измеряют частоту, соответствующую максимальному значению производной от активной составляющей проводимости, максимальное значение этой производной, активную составляющую проводимости на частоте максимума производной; добротность вычисляют в соответствии с (4). Описанный метод позволяет упростить процесс и повысить скорость определения добротности за счет измерений только на одной частоте.

Структурная схема устройства для автоматического контроля добротности пьезорезонаторов при их серийном производстве, основанная на рассмотренном выше методе, приведена на рис. 2, где также показаны временные диаграммы сигналов в характерных точках схемы *a* – *d*.

Усилитель мощности *2* на выходе генератора качающейся частоты (ГКЧ) *1* играет роль буфера, разделяющего источник сигнала и цепочку из последовательно включенных токового резистора *4* и ПКЭ *5*. Синхронный детектор *3* формирует на своем выходе активную составляющую проводимости. Дифференциатор *6* позволяет получить производную от активной составляющей проводимости. На выходе делителя *7* будет формироваться итоговый электрический сигнал, соответствующий отношению производной к активной составляющей проводимости. Этот сигнал несет информацию о добротности ПКЭ и управляет работой индикатора добротности *8*.

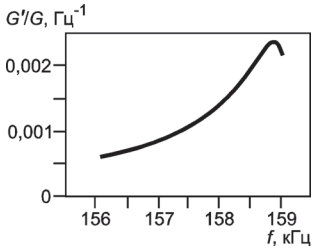

Рис. 1. Частотная зависимость отношения производной проводимости к ее активной составляющей

После подключения ПКЭ между резистором и «земляным» проводом устанавливают на ГКЧ время качания частоты и границы частотного диапазона, в которых находится область резонанса ПКЭ. На выходе синхронного детектора формируется частотная характеристика активной составляющей проводимости и одновременно на выходе дифференциатора — производная от активной составляющей проводимости. На выходе делителя появляется электрический сигнал, равный отношению производной к активной составляющей проводимости, который поступает на вход индикатора добротности. По мере возрастания частоты синусоидального сигнала с ГКЧ увеличивается амплитуда сигнала на выходе делителя. При достижении его максимального значения индикатор фиксирует значение добротности и отключает качание частоты.

Таким образом, если вначале установить между резистором и «земляным» проводом эталонный пьезорезонатор с известной добротностью $Q_{м.э}$ и провести измерения при помощи предлагаемого устройства, то на индикаторе добротности будет сигнал вида $I_э = ЭQ_{м.э}$, где $Э$ — некоторая константа, зависящая от параметров электронных узлов, входящих в состав устройства.

Если теперь настроить индикатор добротности так, что $I_э$ = 100 %, то при последующей установке и измерениях испытываемого пьезорезонатора, однотипного с эталонным,

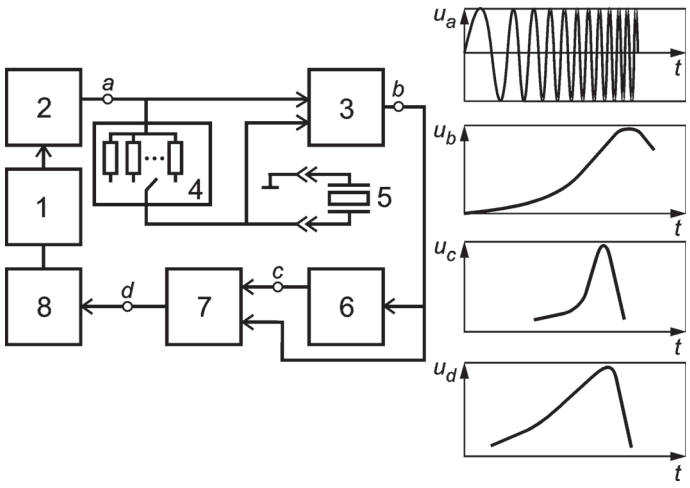

Рис. 2. Структурная схема устройства для контроля добротности пьезорезонаторов и временные диаграммы сигналов в характерных точках *a* — *d*:

1 — генератор качающейся частоты; *2* — усилитель мощности; *3* — синхронный детектор; *4* — токовый резистор; *5* — пьезокерамический элемент; *6* — дифференциатор; *7* — делитель; *8* — индикатор добротности

т. е. имеющего ту же форму и размеры, показания индикатора будут

$$I = ЭQ_м = I_э Q_м / Q_{м.э} = (Q_м / Q_{м.э}) \cdot 100.$$

Таким образом, сигнал на индикаторе будет показывать, какую долю в процентах составляет добротность испытываемого пьезорезонатора от добротности эталонного образца, что и позволяет контролировать пьезорезонаторы по добротности.

Для проверки представленных результатов был разработан программно-аппаратный комплекс на основе LABView.

В таблице приведены результаты эксперимента для образца ПКЭ в виде стержня из материала ЦТБС-3. В эксперименте добротность ПКЭ меняли путем его механического демпфирования. Для определения добротности использовали три метода: первый метод ($Q_{м1}$) опирался на измерения ширины резонансной кривой активной составляющей проводимости на уровне 0,5 максимального значения; второй метод ($Q_{м2}$) — на формулу (3); третий метод ($Q_{м3}$) — на формулу (4). Дополнительные относительные погрешности $\delta_{2,3} = (Q_{м2,3} - Q_{м1}) / Q_{м1}$ возникают при измерении добротности вторым и третьим методом по отношению к первому.

ПКЭ	$Q_{м1}$	$Q_{м2}$	δ_2, %	$Q_{м3}$	δ_3, %
1	351,7	348,8	0,8	343,7	2,2
2	316,8	313,2	1,1	310,4	2,0

Аналогично этому методу можно сформулировать метод контроля пьезомодуля материала пьезорезонатора простой формы (стержень, столбик, кольцо, шайба и т. д.) по измерениям на одной частоте параметров элементов эквивалентной электрической схемы пьезорезонатора [5]:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \Big/ \left(\omega_p^2 L\right) = \beta_{ij} C = \beta_{ij} \Big/ \left(\omega_p R Q_м\right),$$

где β_{ij} — некоторая константа, зависящая от упругих свойств материала и геометрии ПКЭ.

Выводы. При измерении частотной характеристики активной составляющей проводимости пьезорезонатора и ее дифференцировании по частоте существует возможность получения механической добротности только по измерениям на одной частоте, соответствующей максимуму производной: измеряют максимальное значение производной и активную составляющую проводимости на частоте максимума производной.

Применение метода позволит повысить производительность контроля пьезорезонаторов при массовом производстве за счет уменьшения объема измерений и автоматической разбраковки пьезорезонаторов по добротности, поскольку сразу после измерений формируется электрический сигнал, соответствующий добротности.

Литература

1. **Земляков В. Л.** Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009.

2. **Пьезокерамические** преобразователи: Справ. пособие / Под ред. С. И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984.

3**. Земляков В. Л., Ключников С. Н.** Определение параметров пьезокерамических элементов по амплитудным измерениям // Измерительная техника. 2010. № 3. С. 38—40. **Zemlyakov V.L., Klyuchnikov S. N.** Determination of the parameters of piezoceramic elements from amplitude measurements // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 3. P. 301—304.

4. **Пат. 2059209 РФ.** Способ измерения добротности объекта и устройство для его осуществления / Е. И. Дороднов, Б. П. Ерыхов // Изобретения.1996. № 12.

5. **Земляков В. В., Земляков В. Л.** Новый подход к измерению пьезомодуля пьезокерамических материалов в динамическом режиме // Измерительная техника. 2002. № 4. С. 52—55; **Zemlyakov V. V., Zemlyakov V. L.** A New Approach to Measuring the Piezomodulus of a Piezoceramic Material under Dynamic Conditions // Measurement Techniques. 2002. V. 45. N 4. P. 421—426.

Дата принятия 22.05.2012 г.