

Метод контроля качества пьезоэлектрических преобразователей

В.К. Доля, В.Л. Земляков, С.Н. Ключников

Южный федеральный университет, Ростов н/Д, Россия

Аннотация: В статье получены соотношения для определения чувствительности пьезообразователя. Предложен эффективный метод контроля чувствительности по электрическим измерениям.

Ключевые слова: пьезопреобразователь, чувствительность, электрические измерения

При серийном выпуске пьезопреобразователей различного назначения, как правило, проводится контроль их соответствия определенным требованиям[1]. Измеряют с электрической стороны его емкость, частоту резонанса, эффективный коэффициент электромеханической связи, добротность. В статье приводятся результаты, которые позволяют повысить информативность контроля пьезопреобразователей за счет определения с электрической стороны их итоговой чувствительности.

Предлагаемый метод контроля чувствительности является дальнейшим развитием методов определения пьезомодуля материала через параметры элементов эквивалентной электрической схемы пьезоэлемента [2-6].

Обоснование метода проведем на примере пьезоакселерометра (датчика вибраций), который имеет монолитную конструкцию и обособленный резонанс.

Рассмотрим пьезоакселерометр, состоящий из элементов: основание, пьезоэлемент и инерционная масса. Известно[7], что эта конструкция может быть представлена в виде эффективных масс m_o , m_i (основания и инерционной, соответственно), упругости K и сопротивления потерь r . В принятых обозначениях механическая схема пьезоакселерометра показана на рис.1 (a - ускорение, действующее на вход пьезоакселерометра).

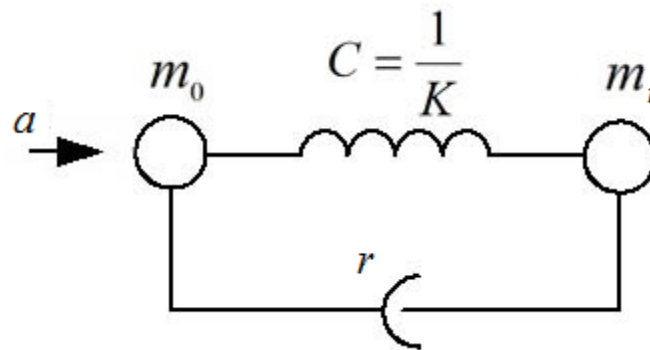


Рис. 1. Механическая схема виброприемника, состоящего из основания, пьезоэлемента и инерционного элемента

Запишем уравнения электромеханического преобразования для пьезоэлемента, выбрав в качестве переменных напряжение U на его электрической стороне и скорость $V = \omega x$ (ω - частота, x - изменение размера пьезоэлемента) на механической стороне[8]:

$$\begin{aligned} I &= j\omega C_o U + NV, \\ F &= -NU + \left(\frac{1}{j\omega C} + r \right) V, \end{aligned} \quad (1)$$

где I – ток на электрической стороне,

F – сила на механическом входе,

C_o – емкость пьезоэлемента при $V = 0$,

$C = 1/K$ – эффективная гибкость пьезоэлемента,

$N = \mu_n C_o$, μ_n - коэффициент электромеханического преобразования.

При возбуждении пьезоакселерометра частоте ω со стороны основания ускорением a и силой F для пьезоэлемента выполняются следующие граничные условия:

$$V = \frac{a - a_i}{\omega}; F_i = m_i a_i = F - m_o a, \quad (2)$$

где a_i - ускорение инерционной массы.

Из уравнений (1) с учетом (2) получаем систему уравнений, описывающую пьезоакселерометр как электромеханический четырехполюсник, на механическом и электрическом входах которого действуют F и a , U и I соответственно:

$$\begin{aligned} NU &= \left(\frac{1}{j\omega C} + r \right) \frac{a - a_i}{\omega} - m_i a_i, \\ NU &= \left(\frac{1}{j\omega C} + r \right) \frac{a - a_i}{\omega} + m_o a - F, \\ I &= j\omega C_o U + N \frac{a - a_i}{\omega}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если использовать идеальный электромеханический трансформатор с коэффициентом трансформации N , получаем эквивалентную электромеханическую (рис. 2, а) схему пьезоакселерометра. Используя известные из электротехники формулы пересчета сопротивлений из одной обмотки трансформатора в другую, получим электрическую схему пьезоакселерометра (рис. 2, б). Приняты следующие обозначения:

$$C_d = CN^2, R = r/N^2, \quad L_i = m_i/N^2, \quad L_o = m_o/N^2,$$

где C_d , R , L_i , L_o - электрические аналоги соответствующих механических величин C , r , m_i , m_o [9].

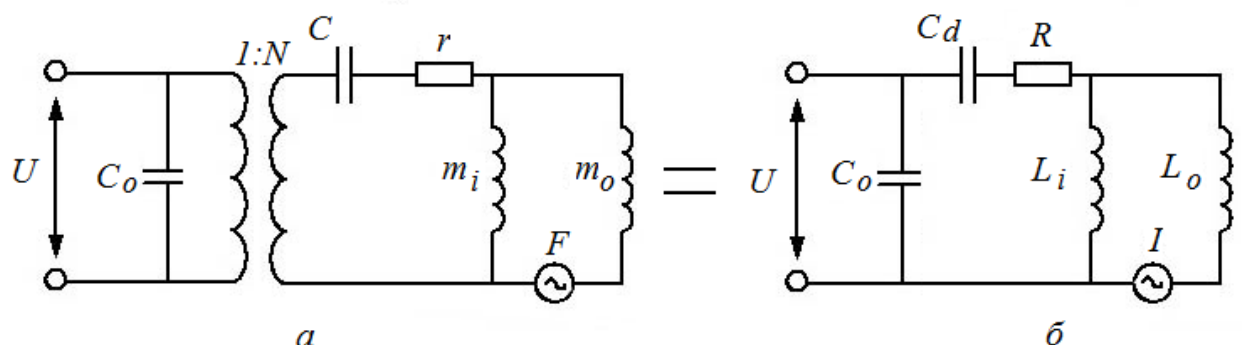


Рис. 2. Эквивалентная электромеханическая (а) и электрическая (б) схемы пьезоакселерометра

Из анализа эквивалентной схемы следует, что для чувствительности (коэффициента преобразования) пьезоакселерометра, справедливо следующее соотношение:

$$\gamma(\omega) = \left(\frac{U}{a}\right) = \frac{m_i N}{\omega C_o r \sqrt{1 + \theta^2 v^2}}, \quad (4)$$

где $v = \frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}$,

$\theta = \frac{\omega_o m_i}{r} = \frac{\omega_o L_i}{R}$ добротность преобразователя,

$\omega_o^2 = \frac{C_d + C_o}{L_i(C_o C_g)}$ резонансная частота пьезоакселерометра при его

возбуждении с механической стороны. Рабочий диапазон частот ω пьезоакселерометров, как правило, выбирается из условия $\omega \ll \omega_o$. В этом случае чувствительность на низких частотах определяется формулой:

$$\gamma_o = \frac{m_i C_d}{N(C_o + C_d)}, \quad (5)$$

Таким образом, для определения чувствительности γ_o пьезоакселерометров известной конструкции необходимо измерить величины C_o , C_d и N . Последнее возможно в результате того, что на электрический вход пьезоакселерометра подается напряжение вида $U(t) = U \cos(\omega_p t + \varphi)$, а механический вход не подвергается возбуждению. Эквивалентная схема для этого случая представлена на рис.3.

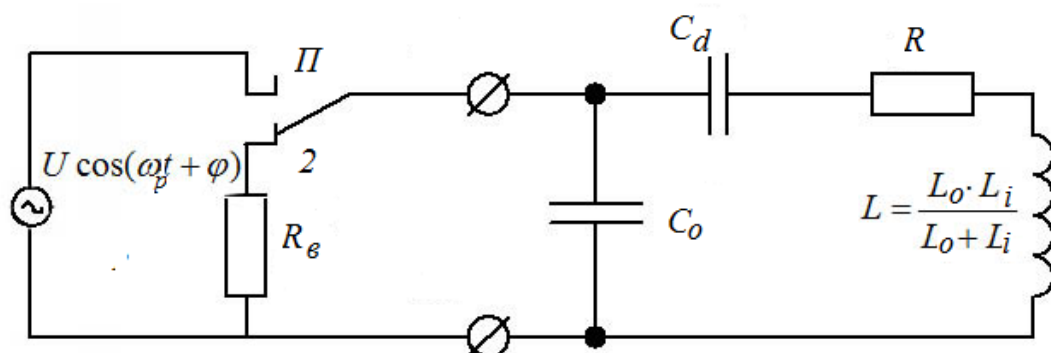


Рис. 3. Реализация измерений

Пусть в момент времени $t = 0$ возбуждение прекращается и переключатель П переводится в положение "2".

Ток через сопротивление R_e ($R_e \ll \frac{1}{\omega_p C_o}$) определяется соотношением

$$I(t) = I_o \cos(\omega_p t + \varphi) e^{-\delta t}, \quad (6)$$

где $\delta = \omega_p / 2\theta$ – декремент затухания,

θ – механическая добротность преобразователя;

I_o, φ – начальная амплитуда и фаза свободных затухающих колебаний.

В силу условия непрерывности (равенстве токов в последовательной цепи R, L, C , в момент отключения и в начальный момент свободных колебаний) имеем:

$$\varphi = 0, \quad I(t) = \frac{U}{R} (\cos \omega_p t) e^{-\delta t}. \quad (7)$$

Или при $t \rightarrow 0 \quad I_o \rightarrow U/R$.

Таким образом, измеряя амплитуду тока через сопротивление R_e сразу после отключения возбуждающего напряжения, можно определить величину R :

$$R = \frac{U}{I_o}. \quad (8)$$

Принимая во внимание, что

$$R = \frac{\omega_p L}{\theta} = \frac{\omega_p m_i m_o}{\theta (m_i + m_o) N_2^2}, \quad (9)$$

получаем соотношение, определяющее коэффициент трансформации:

$$N = \sqrt{\frac{\omega_p m_i m_o}{R \theta (m_i + m_o)}} \quad (10)$$

Используя для θ выражение $\theta = 1/\omega_p R C_d$, получаем

$$C_d = 1/\omega_p R \theta \quad (11)$$

В соответствии с законом Кирхгофа ток I , протекающий на входе пьезоакселерометра при его возбуждении, представляет собой сумму тока через емкость C_o и тока в последовательной R,L,C цепи то есть

$$I = U \sqrt{(\omega_p C_o)^2 + \frac{1}{R^2}}. \quad (12)$$

Последнее соотношение с учетом (8) позволяет определить C_o

$$C_o = \sqrt{I^2 - I_o^2} \frac{1}{U \omega_p} \quad (13)$$

Решив совместно (5), (9), (11), (13) получаем

$$\gamma_0 = \frac{1}{N} \frac{m_i C_g}{C_o + C_g} = KV \frac{\sqrt{\frac{U}{I_o \omega_p}} \theta}{1 + \theta \sqrt{\frac{I^2}{I_o^2} - 1}}, \quad (14)$$

где U – амплитуда напряжения радиоимпульса возбуждения,

I – амплитуда тока возбуждения преобразователя,

I_o – амплитуда тока в начале переходного процесса,

θ – механическая добротность.

Постоянная KV , входящая формулу (14), зависит только от величин m_o и m_i , которые в условиях серийного производства у всех пьезоакселерометров равны. Это позволяет, однократно измерив KV на одном из пьезоакселерометров например, с помощью вибростенда путем прямого измерения γ_0 и последующего вычисления KV из уравнения (14), использовать эту величину в качестве постоянной для всей последующей партии.

Таким образом, метод контроля пьезоэлектрических преобразователей по величине чувствительности заключается в том, что в преобразователе возбуждают механические колебания путем подачи на его электроды радиоимпульса известной амплитуды с прямоугольной огибающей и частотой заполнения, равной частоте его механического резонанса, измеряют амплитуду тока возбуждения, возбуждение прерывают, в момент равенства

нулю мгновенного значения напряжения на электродах преобразователя, электроды замыкают и измеряют амплитуду тока в начале переходного процесса, измеряют величину механической добротности по скорости затухания переходного процесса, а величину чувствительности преобразователя определяют по формуле (14).

Компьютерное моделирование метода проводилось в Matlab+Simulink. Структурная схема устройства для моделирования приведена в [10].

Аппаратная реализация метода.

Структурная схема устройства, реализующая метод, показана на рис. 4 и содержит генератор 1 синусоидальных сигналов, соединенный с частотомером 2 и через ключ 3 с усилителем мощности 4. К выходу усилителя подключены последовательно соединенные пьезопреобразователь 5 и резистор 6. На рисунке также показаны коммутатор 7, измерительный блок 8 и блок 9 управления.

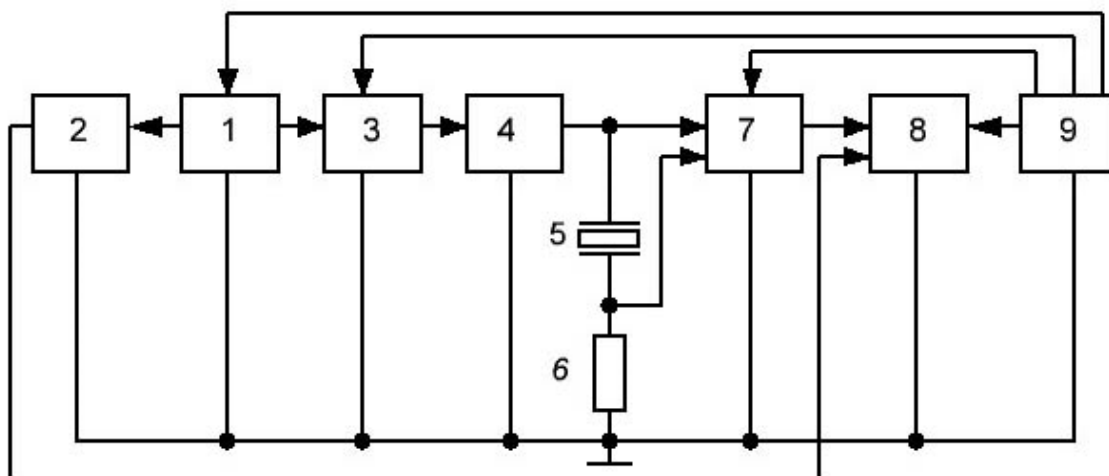


Рис. 4. Структурная схема устройства

Метод осуществляют следующим образом.

Возбуждают пьезопреобразователь 5 радиоимпульсом с прямоугольной огибающей. Для этого по команде с блока 9 управления включают генератор 1 и ключ 3. Измеряют амплитуду радиоимпульса U . Для этого подают на

вход блока 8 сигнал с выхода усилителя 4 через коммутатор 7. Затем обрывают радиоимпульс в момент, соответствующий равенству нулю напряжения на преобразователе ($\varphi = \pi/2$). Для этого, по команде с блока 9 изменяют длительность радиоимпульса и фиксируютс помощью блока 8 фазу напряжения на преобразователе. При выполнении условия $\varphi = \pi/2$ (переход напряжения через 0) блок 9 выдает сигнал, запирающий ключ 3, и возбуждение преобразователя прекращается.

Далее устанавливают частоту заполнения радиоимпульса ω_p . Для этого на вход блока 8 через коммутатор 7 подают сигнал с резистора 6 ($R_6 \ll \frac{1}{\omega_p C_0}$), пропорциональный току короткого замыкания. В блоке 8 проводится определение амплитуды тока I_0 в начале переходного процесса. По команде с блока 9 в генераторе 1 происходит изменение частоты генерируемых колебаний, и процедура измерения величины I_0 повторяется. В момент, когда зафиксирован максимум I_0 , изменение частоты сигнала в генераторе 1 прекращается.

Для измерения частоты ω_p сигнал с частотомера 2 подается в блок 8. Затем измеряют амплитуду тока I , протекающего через преобразователь во время действия радиоимпульса, и амплитуду тока I_0 в начале переходного процесс, возникающего после прекращения действия радиоимпульса.

Для определения механической добротности преобразователя θ с помощью блока 8 измеряют скорость затухания переходного процесса.

Значение постоянной KV для партии испытуемых преобразователей измеряется заранее и заносится в память блока 8.

В соответствии с формулой (14) определяют чувствительность γ пьезоакселерометра и делают вывод о его качестве.

Литература

1. Земляков В. Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. 180 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 5).
 2. V.L. Zemlyakov Methods for Determination of the Piezoelectric Coefficient of Piezoceramic Materials in Terms of Parameters of an Equivalent Circuit of a Piezoelement // Piezoelectric and Related Materials: Investigations and Applications. Pub. Date: 2012 2nd Quarter, pp. 117-142.
 3. Zemlyakov V.L., Klyuchnikov S. N. Determination of the parameters of piezoceramic elements from amplitude measurements// Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 4. P. 301.
 4. Земляков В. Л., Толмачев С.А. Диагностика пьезокерамического элемента по активной составляющей проводимости // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1780.
 5. Земляков В. Л., Ключников С. Н. Упрощенное определение параметров пьезоматериалов на образцах элементов в форме диска. Инженерный вестник Дона. – 2012. №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1038.
 6. Земляков В. Л. Методы и средства технической диагностики пьезокерамических элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. № 10. С. 61–65.
 7. Янчич В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры): монография. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. 304 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение т. 7).
 8. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоатомиздат. 1990. 272 с.
 9. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 356с.
 10. Земляков В. Л. Компьютерное моделирование измерительных средств для контроля пьезомодуля // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Технические науки. 2010. № 1. С. 42–44.
-

References

1. Zemlyakov V. L. Metody i sredstva izmereniy v p'ezoelektricheskom priborostroenii: monografiya [Measurements Methods and Means in Piezoelectric Device-making]. Rostov on Don. YuFU. 2009. 180 p. (P'ezoelektricheskoe priborostroenie. T. 5).
2. Zemlyakov V.L. Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. 2012 2nd Quarter, pp. 117-142.
3. Zemlyakov V.L., Klyuchnikov S. N. Measurement Techniques. 2010. V. 53. № 4. p. 301.
4. Zemlyakov V. L., Tolmachev S.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1780.
5. Zemlyakov V. L., Klyuchnikov S. N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1038
6. Zemlyakov V. L. Izv. vuzov. Priborostroenie. 2010. № 10. pp. 61–65.
7. Yanchich V.V. P'ezoelektricheskie vibroizmeritel'nye preobrazovateli (akselerometry): monografiya [Piezoelectric vibration-measuring converters (accelerometers)]. Rostov on Don. YuFU. 2010. 304 p. (P'ezoelektricheskoe priborostroenie. T. 5).
8. Aronov B.S. Elektromekhanicheskie preobrazovateli iz p'ezoelektri-cheskoj keramiki [Electromechanical converters from piezoelectric ceramics]. L.: Energoatomizdat. 1990. 272 p.
9. P'ezokeramicheskie preobrazovateli: Spravochnik [Piesoceramic transformers. Reference manual]. Under S.I. Pugachev edition. L.:Sudostroenie, 1984. 356 p.
10. Zemlyakov V. L. Izv. vuzov. Sev.-Kav. region. Tekhnicheskie nauki. 2010. № 1. pp. 42–44.