**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 представлены в виде эффективных масс $m\_{o}, m\_{i}$(основания и инерционной, соответственно), упругости *К* 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 качество переменных напряжение *U* на его электрической стороне и скорость *V*=$ωx$ ($ω$ - частота, $x$ - изменение размера пьезоэлемента) на механической стороне[8]:

$$I=jωC\_{o}U+NV,$$

 (1)

$$F=-NU+\left(\frac{1}{jωC}+r\right)V,$$

где *I*– ток на электрической стороне,

*F*– сила на механическом входе,

$C\_{o}$ – емкость пьезоэлементапри V= 0,

*С*=1/*К*– эффективная гибкость пьезоэлемента,

$N=μ\_{n}C\_{o}$, $μ\_{n}$ - коэффициент электромеханического преобразования.

При возбуждении пьезоакселерометрана частоте $ω$ со стороны основания ускорением $a$ и силой *F* для пьезоэлементавыполняются следующие граничные условия:

$V=\frac{a-a\_{i}}{ω}; F\_{i}=m\_{i}a\_{i}=F-m\_{o}a ,$ (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 действуютFи$a$, UиIсоответственно:

$$NU=\left(\frac{1}{jωC}+r\right)\frac{a-a\_{i}}{ω}-m\_{i}a\_{i} ,$$

$NU=\left(\frac{1}{jωC}+r\right)\frac{a-a\_{i}}{ω}+m\_{o}a-F , $ (3)

$$I=jωC\_{o}U+N\frac{a-a\_{i}}{ω}.$$

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:

$$C\_{d}=CN^{2}, R={r}/{N^{2}, L\_{i}={m\_{i}}/{N^{2},}} L\_{o}={m\_{o}}/{N^{2}, }$$

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:

$γ\left(ω\right)=\left(\frac{U}{a}\right)=\frac{m\_{i}N}{ωC\_{o}r\sqrt{1+θ^{2 } ν^{2}}} ,$ (4)

где$ν=\frac{ω}{ω\_{o}}-\frac{ω\_{o}}{ω},$

$θ=\frac{ω\_{o}m\_{i}}{r}=\frac{ω\_{o}L\_{i}}{R}$– добротность преобразователя,

$ω\_{0}^{2}=\frac{C\_{d}+C\_{o}}{L\_{i}(C\_{o}C\_{g})}$– резонансная частота пьезоакселерометра при его возбуждении с механической стороны. Рабочий диапазон частот $ω$ пьезоакселерометров, как правило, выбирается из условия $ω\ll ω\_{o}$. В этом случае чувствительность на низких частотах определяется формулой:

$γ\_{o}=\frac{m\_{i}C\_{d}}{N(C\_{o}+C\_{d})}, $ (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*) = $Ucos$($ω\_{p}t+φ$), 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 $R\_{в} (R\_{в}\ll \frac{1}{ω\_{p}C\_{o}})$ определяется соотношением

$I\left(t\right)=I\_{o}\cos(\left(ω\_{p}t+φ\right))e^{-δt}, $ (6)

где $δ={ω\_{p}}/{2θ}$–декремент затухания,

$θ$– механическая добротность преобразователя;

$I\_{o, }φ$– начальная амплитудаи 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:

$φ=0, I\left(t\right)=\frac{U}{R}\left(cosω\_{p}t\right)e^{-δt} .$ (7)

Или при *t*$\rightarrow 0 I\_{0}\rightarrow {U}/{R}.$

Таким образом, измеряя амплитуду тока через сопротивление $R\_{в}$ сразу после отключения возбуждающего напряжения, можно определить величину *R*:

$R=\frac{U}{I\_{0}}.$(8)

Принимая во внимание, что

$R=\frac{ω\_{p}L}{θ}=\frac{ω\_{p}m\_{i}m\_{o}}{θ(m\_{i}+m\_{o})N\_{2}^{2}}$, (9)

получаем соотношение, определяющее коэффициент трансформации:

$N=\sqrt{\frac{ω\_{p}m\_{i}m\_{o}}{Rθ(m\_{i}+m\_{o})}}$(10)

Используя для $θ$ выражение$θ={1}/{ω\_{p}}RC\_{d}$, получаем

$C\_{d}={1}/{ω\_{p}}Rθ$(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

$I=U\sqrt{(ω\_{p}C\_{o})\_{}^{2}+\frac{1}{R^{2}}}$. (12)

Последнее соотношение с учетом (8) позволяет определить $C\_{o}$

$C\_{o}=\sqrt{I^{2}-I\_{o}^{2}}\frac{1}{Uω\_{p}}$(13)

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

$γ\_{0}=\frac{1}{N}\frac{m\_{i}C\_{g}}{C\_{o}+C\_{g}}=KV\sqrt{\frac{U\_{}}{I\_{o}ω\_{p}}θ}\frac{1}{1+θ\sqrt{\frac{I^{2}}{I\_{o}^{2}}-1}} , $ (14)

где*U*– амплитуда напряжения радиоимпульса возбуждения,

*I*– амплитуда тока возбуждения преобразователя,

$I\_{o}$– амплитуда тока в начале переходного процесса,

$θ$– механическая добротность.

Постоянная *КV*, входящая формулу (14),зависит только от величин $m\_{o}иm\_{i}$, которые в условиях серийного производства у всех пьезоакселерометров равны. Это позволяет, однократно измерив *КV* на одном из пьезоакселерометров например, с помощью вибростенда путем прямого измерения $γ\_{0}$ и последующего вычисления *КV* 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 добротностипо 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, реализующаяметод, 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 рисункетакже 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 ($φ={π}/{2}$). Для этого, по команде с блока 9 изменяют длительность радиоимпульса и фиксируютс помощью блока 8 фазу напряжения на преобразователе. При выполнении условия $φ={π}/{2}$ (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 ($R\_{в}\ll \frac{1}{ω\_{p}C\_{o}}$), пропорциональный току короткого замыкания. В блоке 8 проводится определение амплитуды тока $I\_{o}$ в начале переходного процесса. По команде с блока 9 в генераторе 1 происходит изменение частоты генерируемых колебаний, и процедура измерения величины$I\_{o}$ повторяется. В момент, когда зафиксирован максимум $I\_{o}$, изменение частоты сигнала в генераторе 1 прекращается.

Для измерения частоты $ω\_{p}$сигнал с частотомера 2 подается в блок 8. 3атем измеряют амплитуду тока *I* ,протекающего через преобразователь во время действия радиоимпульса, и амплитуду тока $I\_{o}$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 *КV* 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, рр. 117-142.
3. Zemlyakov V.L., Klyuchnikov S. N. Determination of the parameters of piezoceramic elements from amplitude measurements// [Measurement Techniques](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=1814). 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 пьезоэлектри-ческой 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-cheskoy 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.