**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 (основания и инерционной, соответственно), упругости *К* и сопротивления потерь *r*. В принятых обозначениях механическая схема пьезоакселерометра показана на рис.1( - ускорение, действующее на вход пьезоакселерометра).

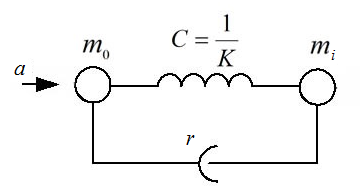


Рис. 1. Механическая схема виброприемника, состоящего из основания, пьезоэлемента и инерционного элемента

Запишем уравнения электромеханического преобразования для пьезоэлемента, выбрав в качество переменных напряжение *U* на его электрической стороне и скорость *V*= ( - частота, - изменение размера пьезоэлемента) на механической стороне[8]:

(1)

где *I*– ток на электрической стороне,

*F*– сила на механическом входе,

– емкость пьезоэлементапри V= 0,

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

, - коэффициент электромеханического преобразования.

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

(2)

где - ускорение инерционной массы.

Из уравнений (1) с учетом (2) получаем систему уравнений, описывающую пьезоакселерометр как электромеханический четырехполюсник, на механическом и электрическом входах которого действуютFи, UиIсоответственно:

(3)

Если использовать идеальный электромеханический трансформатор с коэффициентом трансформации 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:

где - электрические аналоги соответствующих механических величин [9].

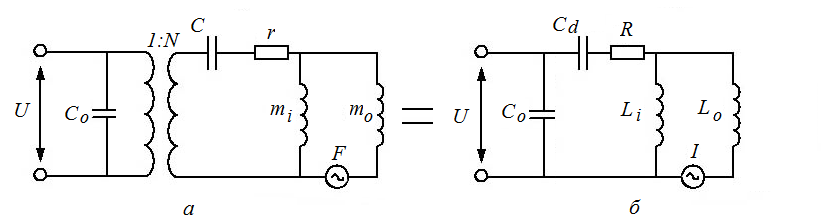


Рис. 2. Эквивалентная электромеханическая (*а*) и электрическая (*б*) схемы пьезоакселерометра

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

(4)

где

– добротность преобразователя,

– резонансная частота пьезоакселерометра при его возбуждении с механической стороны. Рабочий диапазон частот пьезоакселерометров, как правило, выбирается из условия . В этом случае чувствительность на низких частотах определяется формулой:

(5)

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

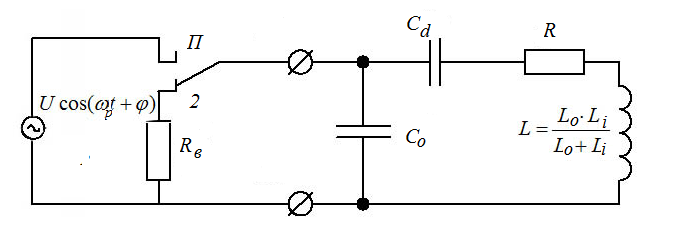


Рис. 3. Реализация измерений

Пусть в момент времени возбуждение прекращается и переключатель П переводится в положение "2".

Ток через сопротивление определяется соотношением

(6)

где –декремент затухания,

– механическая добротность преобразователя;

– 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:

(7)

Или при *t*

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

(8)

Принимая во внимание, что

, (9)

получаем соотношение, определяющее коэффициент трансформации:

(10)

Используя для выражение, получаем

(11)

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

. (12)

Последнее соотношение с учетом (8) позволяет определить

(13)

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

(14)

где*U*– амплитуда напряжения радиоимпульса возбуждения,

*I*– амплитуда тока возбуждения преобразователя,

– амплитуда тока в начале переходного процесса,

– механическая добротность.

Постоянная *КV*, входящая формулу (14),зависит только от величин , 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 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.

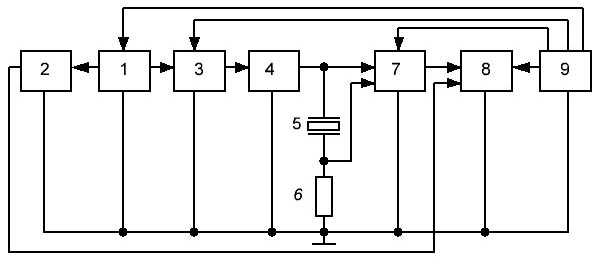


Рис. 4. Структурная схема устройства

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 (). Для этого, по команде с блока 9 изменяют длительность радиоимпульса и фиксируютс помощью блока 8 фазу напряжения на преобразователе. При выполнении условия (переход напряжения через 0) блок 9 выдает сигнал, запирающий ключ 3, и возбуждение преобразователя прекращается.

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

Для измерения частоты сигнал с частотомера 2 подается в блок 8. 3атем измеряют амплитуду тока *I* ,протекающего через преобразователь во время действия радиоимпульса, и амплитуду тока в начале переходного процесс, возникающего после прекращения действия радиоимпульса.

Для определения механической добротности преобразователя 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 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.