

УДК 004.942; 539.3

М.П. Мусиенко¹, А.М. Коваленко²

¹ Черноморский государственный университет имени Петра Могилы, Николаев

² Черкасский государственный технологический университет, Черкассы

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ОДНИМ МОНОМОРФНЫМ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

В работе описан разработанный метод измерения нескольких физических одним мономорфным пьезокерамическим преобразователем. Предложенная предварительная обработка измерительной информации, которая осуществляется с помощью DSP процессора, расположенного с серией дополнительных микродатчиков на пьезоэлементе, позволяет уменьшить влияние дестабилизирующих факторов на процесс измерения. Приведены результаты математического моделирования и экспериментального исследования. Полученные результаты позволяют разрабатывать полиизмерительные системы на основе одного мономорфного пьезокерамического преобразователя.

Ключевые слова: мономорфный пьезокерамический преобразователь, DSP процессор, обратное дискретное преобразование Фурье.

Введение

Пьезокерамические преобразователи широко используются для измерения многих физических величин (силы, давления, ускорения, массы, угловых скоростей, момента, деформации, влажности, температуры и т.д.) [1]. При этом в большинстве случаев рассматриваются пьезоэлектрические преобразователи для измерения одной физической величины, выполненные с использованием одного мономорфного пьезоэлемента.

Для измерения нескольких разнородных величин преобразователь, как правило, представляет собой конструктивно объединенные в один корпус несколько чувствительных элементов [2, 3]. Такое исполнение ведет к конструктивному усложнению датчика, увеличению массогабаритных показателей и прочее, что усложняет использование таких изме-

рителей в местах с ограниченным пространством. Поэтому актуальным является разработка пьезокерамических преобразователей с одним чувствительным элементом, позволяющим измерять несколько физических величин.

Анализ последних исследований. Для решения указанной задачи известно использование многомодового режима работы пьезоэлектрических преобразователей [4]. При одновременном воздействии на пьезоэлемент двух физических величин извлечение информации из суммарного выходного сигнала осуществляется благодаря использованию разнесенных резонансных частот, при котором каждой измерительной величине соответствует своя резонансная частота [4]. Недостатком этого метода является сложность проектирования чувствительных элементов, обусловленная сложностью обеспечения заданного частотного расстояния между ра-

бочими частотами, а также сложностью обеспечения достаточной интенсивности их колебаний при требовании ослабления побочных резонансов [4].

Авторами разработан метод измерения нескольких физических величин с помощью одного чувствительного элемента, в котором каждой измеряемой величине соответствует своя определенная форма дополнительного сигнала, подаваемого на пьезоэлемент с помощью дополнительной пары электродов [5, 6]. Недостатками данного метода являются невозможность измерения быстро изменяющихся во времени входные величины, а также большая погрешность при измерении более двух физических величин.

Целью данной работы является разработка метода измерения одним мономорфным пьезокерамическим преобразователем нескольких физических величин, позволяющего производить измерение более двух физических величин.

Изложение основного материала

В процессе измерения нескольких физических величин одним мономорфным пьезокерамическим элементом на выходе формируется выходной сигнал сложной формы. Процесс выделения информационных составляющих из суммарного электрического сигнала целесообразно произвести с помощью DSP-процессора (digital signal processor) с использованием соответствующего математического аппарата обработки сигнала. Как правило, сигнал от датчика (в конструкции которого могут находиться некоторые узлы предварительной обработки сигнала: предусилители и т.д.), по какому-либо каналу связи передается в центр обработки информации, где и происходит его обработка с использованием вычислительных мощностей, включая DSP-процессор.

Во время измерения на пьезоэлемент воздействует множество дестабилизирующих факторов (изменяющаяся температура, вибрация, влажность и прочее), которые вносят погрешность в процесс измерения. Для учета и, соответственно, устранения этих составляющих из выходного сигнала необходимо иметь значения дестабилизирующих величин, которые можно получить с помощью соответствующих датчиков (датчиков температуры, акселерометров и пр.). Однако использование дополнительных датчиков в конструкции пьезопреобразователя сводит на нет саму идею измерения нескольких величин с помощью пьезопреобразователя.

В работе было предложено разместить DSP-процессор непосредственно на мономорфном пьезокерамическом элементе с использованием некоторого количества необходимых микродатчиков. Микродатчики могут быть выполнены как в составе DSP-процессора (например, чаще всего в их конструкции применены микродатчики температуры), так

и отдельно на поверхности пьезоэлемента (например, микроакселерометры). Такое исполнение возможно в виду того, что площади поверхностей мономорфных пьезоэлементов занимают единицы сантиметров, в то время как размеры DSP-процессоров и микродатчиков – миллиметры и доли миллиметров. Кроме того, дополнительные элементы могут располагаться не только на поверхности пьезоэлемента, но и на конструктивных элементах внутри корпуса датчика.

Таким образом, описанное исполнение мономорфного пьезопреобразователя позволяет не только получать интересующие параметры дестабилизирующих факторов, но и производить процесс обработки информации до ее распространения по каналам передачи данных. Кроме того, появляется возможность производить корректировку выходного сигнала с помощью обратных связей, подаваемых от процессора на пьезоэлемент через дополнительные электроды. Все это позволяет существенно повысить точность измерения, в результате чего появляется возможность измерения более двух физических величин, в отличие от схем-аналогов.

Предлагаемый метод схематически показан на рис. 1.

На электроды пьезоэлемента воздействуют несколько физических величин $F_1 \dots F_m$, которые возбуждают в пьезоэлементе колебания. В результате на выходе формируется сигнал $U_{\text{вых}}$, который является суммой откликов пьезоэлемента на воздействующие физические величины:

$$U_{\text{вых}}(t) = \sum_{n=1}^m A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \varphi'') + \xi(t), \quad (1)$$

где $\varphi'' = \varphi_n + ((m+1) - n)\varphi'$; A_n – амплитуда; f_n – частота; φ_n – фаза; φ' – фаза задержки; m – количество измеряемых физических величин; $\xi(t)$ – помеха, полученная в результате воздействия на преобразователь дестабилизирующего фактора $F_{\text{пом}}$.

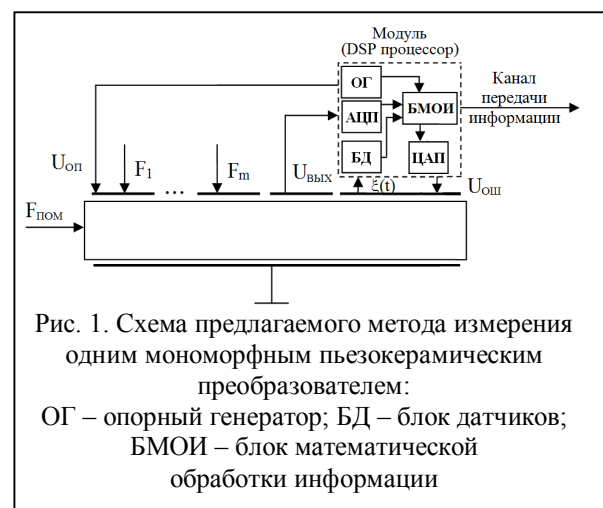


Рис. 1. Схема предлагаемого метода измерения одним мономорфным пьезокерамическим преобразователем:
ОГ – опорный генератор; БД – блок датчиков; БМОИ – блок математической обработки информации

Выделение из суммарного сигнала искомым составляющих осуществляется с помощью математической обработки с использованием размещенного в корпусе датчика DSP-процессора. На первом этапе сигнал $U_{\text{вых}}$ подвергается цифровой обработке, в результате которой выражение (1) принимает вид:

$$U_d = \sum_{k=0}^{K-1} \left(\sum_{n=1}^m (A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \varphi'')) + \xi(t) \right) \times \delta(t - k \cdot \Delta t), \quad (2)$$

где $\delta(t)$ – дельта функция; k – количество дискретов; Δt – время дискретизации. Тогда спектр дискретного сигнала U_d принимает вид:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{K-1} \left(\sum_{n=1}^m (A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \varphi'')) + \xi(t) \right) \times \delta(t - k \cdot \Delta t) \times \exp(-j \cdot \omega \cdot t) dt. \quad (3)$$

Дальнейшая обработка полученного сигнала производится с помощью обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) [7].

Используя решетчатую функцию, выражение для дискретного спектра примет вид:

$$S_d(\omega) = \sum_{p=0}^{K-1} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{K-1} \left(\sum_{n=1}^m (A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \varphi'')) + \xi(t) \right) \times \delta(t - k \cdot \Delta t) \times \exp(-j \cdot \omega \cdot t) dt \right) \times \delta(\omega - p \cdot \Delta \omega), \quad (4)$$

где $S_d(\omega)$ – дискретные отсчеты спектра на одном периоде повторения $\omega = [0; 2\pi / \Delta t]$.

Используя выражение для ОДПФ, получаем:

$$U_{\text{вых}}(t) = C \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{p=0}^{K-1} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{K-1} \left(\sum_{n=1}^m (A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \varphi'')) + \xi(t) \right) \times \delta(t - k \cdot \Delta t) \times \exp(-j \cdot \omega \cdot t) dt \right) \times \delta(\omega - p \cdot \Delta \omega) \times \exp(j \cdot \omega \cdot t) d\omega, \quad (5)$$

где C – коэффициент пропорциональности, обеспечивающий равенство по амплитуде исходного дискретного сигнала и результата ОДПФ. После перестановки операций суммирования и интегрирования с учетом фильтрующего свойства дельта-функции получаем:

$$U_{\text{вых}}(t) = C \sum_{p=0}^{K-1} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{K-1} \left(\sum_{n=1}^m (A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \varphi'')) + \xi(t) \right) \times \delta(t - k \cdot \Delta t) \times \exp(-j \cdot \omega \cdot t) dt \right) \times \delta(\omega - p \cdot \Delta \omega) \times \exp(j \cdot \omega \cdot t) d\omega = \dots \\ \dots = C \sum_{p=0}^{K-1} S(p \cdot \Delta \omega) \cdot \exp(j \cdot p \cdot \Delta \omega \cdot t), \quad (6)$$

где $S(p \cdot \Delta \omega)$ – продискретизированный спектр сигнала $S_d(\omega)$.

Используя дискретные отсчеты $U_{\text{вых}}(t)$ через интервал Δt , выражение для ОДПФ принимает вид:

$$U_{\text{вых}}(n) = \frac{1}{K} \cdot \sum_{p=0}^{K-1} S(p) \cdot \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{K} \cdot k \cdot p\right). \quad (7)$$

Значение помехи, вызванной дестабилизирующим фактором $F_{\text{пом}}$, определяется с помощью блока датчиков и может быть исключено из выражения как математическим путем, так и с помощью синтезированного сигнала $U_{\text{ош}}$, поданного через обратную связь на пьезоэлемент.

Для возможности измерения некоторых физических величин и определения фазового смещения откликов пьезоэлемента на воздействие физических величин, в опорном генераторе синтезируется сигнал, который подается на дополнительный электрод пьезоэлемента. Фазовое смещение позволяет определить участки спектра соответствующие искомым сигналам.

Для проверки полученных положений было проведено компьютерное моделирование с последующим натурным экспериментом.

На рис. 2 показана теоретически полученная переходная характеристика мономорфного пьезокерамического преобразователя при измерении четырех физических величин (моделирование проведено в программе Mathcad 14.0). На рис. 3 приведены результаты разложения суммарного выходного сигнала на искомые составляющие. Для проведения экспериментальных исследований использовался пьезоэлемент в виде бруска из пьезокерамики ЦТС-19 размером 24×10×6 мм.

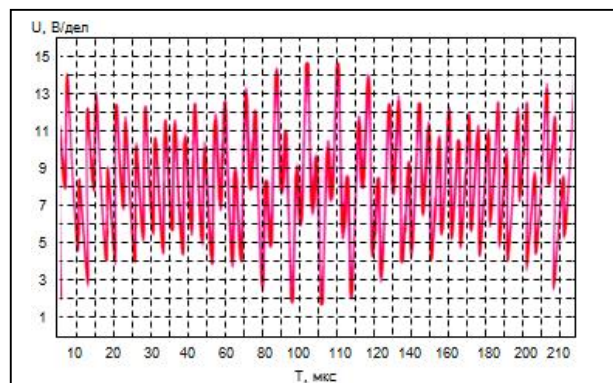


Рис. 2. Теоретическая зависимость переходной характеристики при измерении четырех физических величин

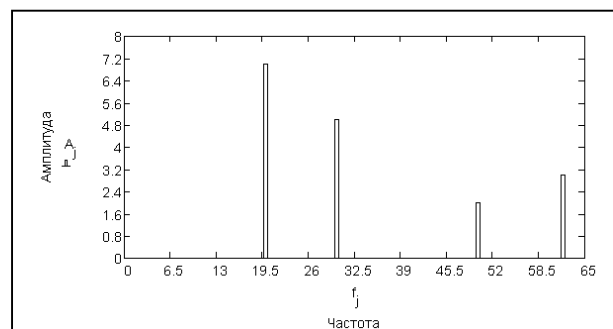


Рис. 3. Результаты разложения суммарного выходного сигнала на искомые составляющие

В качестве DSP-процессора использован цифровой сигнальный процессор фирмы Analog Devices семейства Blackfin BF-537 в комплекте отладочной платы ADZS-BF537-STAMP. Измерения переходных характеристик производились осциллографом С1-55. Один из полученных результатов экспериментальных исследований (при измерении четырех физических величин) показан на рис. 4.

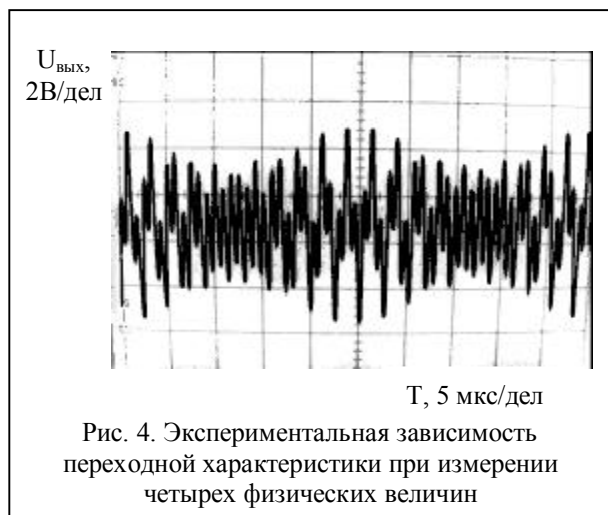


Рис. 4. Экспериментальная зависимость переходной характеристики при измерении четырех физических величин

Как видно из рис. 2 и 4, экспериментально полученные результаты с большой точностью повторяют результаты теоретических исследований, что подтверждает правильность построения модели пьезопреобразователя.

Выводы

Таким образом, в работе разработан новый метод измерения нескольких физических величин одним мономорфным пьезокерамическим преобразователем. Предложенная предварительная обработка измерительной информации (осуществляемая с помощью DSP процессора, расположенного с серией дополнительных микродатчиков на пьезоэлементе) позволяет уменьшить влияние дестабилизирующих факторов на процесс измерения.

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ДЕКІЛЬКОХ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ОДНИМ МОНОМОРФНИМ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

М.П. Мусієнко, А.М. Коваленко

У роботі описаний розроблений метод вимірювання декількох фізичних величин одним мономорфним п'єзокерамічним перетворювачем. Запропонована попередня обробка вимірювальної інформації, що здійснюється за допомогою DSP процесора розташованого з серією додаткових микродатчиків на п'єзоелементі, дозволяє зменшити вплив дестабілізуючих факторів на процес вимірювання. Приведені результати математичного моделювання і експериментального дослідження. Отримані результати дозволяють розробляти полівимірювальні системи на основі одного мономорфного п'єзокерамічного перетворювача.

Ключові слова: мономорфний п'єзокерамічний перетворювач, зворотнє дискретне перетворення Фур'є, процесорна обробка.

METHOD OF MEASURING OF A FEW PHYSICAL SIZES OF ONE MONOMORPHIC PIEZOCERAMICAL TRANSFORMER BY A TRANSFORMER

M.P. Musienko, A.M. Kovalenko

The worked out method of measuring is in-process described a few physical one monomorphic piezoceramic transformer. Offered rough-down of measuring information, carried out by means of DSP of processor, located with the series of additional microtransformer on piezoceramic, allows to decrease influence of destabilizing factors on the process of measuring. Results over of mathematical design and experimental research are brought. The got results allow to develop the multidimensional systems on the basis of one monomorphic piezoceramic transformer.

Keywords: monomorphic piezoceramic transformer, reverse discrete Fourier transform, processor treatment.

Предлагаемое конструктивное исполнение пьезодатчика позволяет производить процесс обработки информации до ее распространения по каналам передачи данных, а также производить корректировку выходного сигнала с помощью обратных связей, подаваемых от процессора на пьезоэлемент. Все это позволяет существенно повысить точность измерения, что дает возможность измерения более двух физических величин одним чувствительным мономорфным пьезоэлементом.

Список литературы

1. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с. – ISBN 996-7533-63-8.
2. Алейников А.Ф. Многофункциональные датчики / А.Ф. Алейников, М.П. Цапенко // Измерения, контроль, автоматизация. – 1990. – № 2 (74). – С. 50-57.
3. Алейников А.Ф. Датчики (перспективные направления развития): учеб. пособ. / А.Ф. Алейников, В.А. Гридчин, М.П. Цапенко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 176 с. – ISBN 5-7782-0300-4.
4. Постников И.И. Моделирование чувствительных элементов для многофункциональных датчиков [Электронный ресурс] / И.И. Постников // Труды международной конференции «Датчики и Системы-2002». – Режим доступа к ресурсу: <http://www.autex.spb.ru/sensor/ss2002/>.
5. Development of multipurpose monotouch piezoelectric transducers / M.P. Musienko, A.M. Kovalenko, V.V. Tuz, S.V. Kutsenko // Вісник Черкаського державного технологічного університету: Спецвипуск. – 2009. – С. 74-76.
6. Спосіб вимірювання декількох фізичних величин за допомогою п'єзоелемента: Пат. №45979 Україна, МК G01L 1/16, G01P 15/09 / Мусієнко М.П., Коваленко А.М., Куценко С.В., Дідук В.А. – №u200902029; Заявл. 06.03.2009; Опубл. 10.12.2009, Бюл. №23.
7. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник: [для студ. вуз., обуч. по спец. "Радиотехника"] / С.И. Баскаков. – 3-е изд., перераб., дополн. – М.: Высшая школа, 2000. – 408 с. – ISBN 5-06-003843-2.

Поступила в редколлегию 10.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Рудницкий, Черкасский государственный технологический университет, Черкассы.