

УДК 004.75:681.5.01

**А.М. Коваленко**, канд. техн. наук, Черкасс. гос. технолог. ун-т,  
**Е.Г. Трофименко**, канд. техн. наук, доц., Нац. ун-т “Одес. юр. акад.”,  
**Л.Н. Буката**, доц., Одес. нац. акад. звязи им. А.С. Попова

## РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МНОГОМЕРНОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*А.М. Коваленко, О.Г. Трофименко, Л.М. Буката. Розробка вимірювальних систем на базі багатомірної п'єзокерамічної перетворювача.* Розглядається підвищення ефективності побудови вимірювальних комп'ютеризованих систем з одним мономорфним п'єзоперетворювачем. Наводиться метод вимірювання одним мономорфним п'єзоелектричним перетворювачем більше двох фізичних величин за рахунок попередньої обробки вимірювальної інформації мікропроцесором. Розташування мікропроцесора на найчутливішому елементі дозволяє зменшити вплив дестабілізуючих факторів на процес вимірювання. Наведено результати математичного моделювання та експериментального дослідження.

*Ключові слова:* мономорфний п'єзокерамічний перетворювач, п'єзоелемент, вимірювальна комп'ютеризована система.

*А.М. Коваленко, Е.Г. Трофименко, Л.Н. Буката. Разработка измерительных систем на базе многомерного пьезокерамического преобразователя.* Рассматривается повышение эффективности построения измерительных компьютеризованных систем с одним мономорфным пьезопреобразователем. Приводятся метод измерения одним мономорфным пьезоэлектрическим преобразователем более двух физических величин за счет предварительной обработки измерительной информации микропроцессором. Расположение микропроцессора на самом чувствительном элементе позволяет уменьшить влияние дестабилизирующих факторов на процесс измерения. Приведены результаты математического моделирования и экспериментального исследования.

*Ключевые слова:* мономорфный пьезокерамический преобразователь, пьезоэлемент, измерительная компьютеризованная система.

*А.М. Kovalenko, E.G. Trofimenko, L.N. Bukata. Development of measurement systems based on multi-dimensional piezoceramic transducer.* Increasing the efficiency of construction of measuring computerized systems with one monomorphic piezotransducer is considered. The method of measurement of more than two physical quantities with the help of one monomorphic piezotransducer by microprocessor's pretreatment of measurement information is presented. Location of the microprocessor on the most sensitive chip allows the sensor to correct the destabilizing factors in the measurement process. The results of mathematical modeling and experimental study are presented.

*Keywords:* monomorphic piezoceramic transducer, piezoelement, measuring computerized system.

Пьезоэлектрические элементы, благодаря уникальным свойствам, присущим пьезокерамике, получают все большую популярность при изготовлении пьезокерамических компонентов для использования в приборостроении, в том числе медицинском, авиационном и железнодорожном транспорте, энергетике, нефтегазовом комплексе. Повышенные пьезоэлектрические и механические свойства элементов из пьезокерамики позволяют создавать современные преобразователи для измерения механических параметров, имеющие высокие измерительные характеристики, безгистерезисность, химическую и радиационную стойкость, простую конструкцию и невысокую стоимость. Сейчас пьезокерамические датчики и преобразователи широко приме-

няются для измерения различных физических величин: деформации, ускорения, силы, влажности, температуры, давления, массы, угловых скоростей, момента и др. [1]. Причем по своим эксплуатационным характеристикам пьезокерамические датчики превосходят приборы аналогичного назначения, выполненные на других физических принципах.

Анализ существующих публикаций показал, что конструктивно используемые пьезоэлектрические преобразователи выполняют с одним мономорфным пьезоэлементом, который предназначен для измерения одной физической величины [2, 3]. Но зачастую возникает необходимость измерения сразу нескольких разнородных физических величин в одной точке, например: при исследовании целостности строительных конструкций в реперных точках, в медицине при эндопротезировании суставов, в авиации при испытаниях беспилотников и др. В таких случаях конструируют преобразователи, объединяя в один корпус несколько чувствительных элементов. Такое исполнение ведет к конструктивному усложнению датчика, увеличению массогабаритных показателей и пр., что усложняет использование таких измерителей в местах с ограниченным пространством. Поэтому актуальным направлением является создание новых и совершенствование существующих пьезокерамических преобразователей.

Поэтому преследовалась цель разработки пьезокерамических преобразователей с одним чувствительным элементом, позволяющим измерять более двух физических величин, для повышения эффективности построения измерительных компьютеризованных систем. Достоинствами таких систем, по сравнению с системами с несколькими датчиками, является быстродействие, стабильное энергопотребление, наличие одного канала связи, простая диагностика и ремонтпригодность.

Сложность состоит в выделении из выходного сигнала сложной формы отдельных информационных составляющих, соответствующих конкретным физическим величинам. Процесс выделения информационных составляющих из суммарного электрического сигнала целесообразно производить 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 пр.), которые вносят погрешность в процесс измерения. Для учета и устранения этих составляющих из выходного сигнала необходимо знать значения дестабилизирующих величин, которые можно получить с помощью соответствующих датчиков (датчиков температуры, акселерометров и др.). Однако использование дополнительных датчиков в конструкции пьезопреобразователя сводит на нет саму идею измерения нескольких величин пьезопреобразователем.

Если же разместить DSP-процессор непосредственно на мономорфном пьезокерамическом элементе с использованием необходимого количества микродатчиков, это позволит не только получить интересующие параметры дестабилизирующих факторов, но и производить процесс обработки информации до ее распространения по каналам передачи данных. 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, поскольку 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.

Описанное исполнение мономорфного пьезопреобразователя также дает возможность производить корректировку выходного сигнала с помощью обратных связей, подаваемых от процессора на пьезоэлемент через дополнительные электроды. Все это существенно повышает

точность измерения, в результате чего появляется возможность измерения более двух физических величин, в отличие от схем-аналогов.

Схемо-функциональная модель описанного метода построения полиизмерительных компьютеризованных систем на базе одного пьезокерамического преобразователя показана на рис. 1.

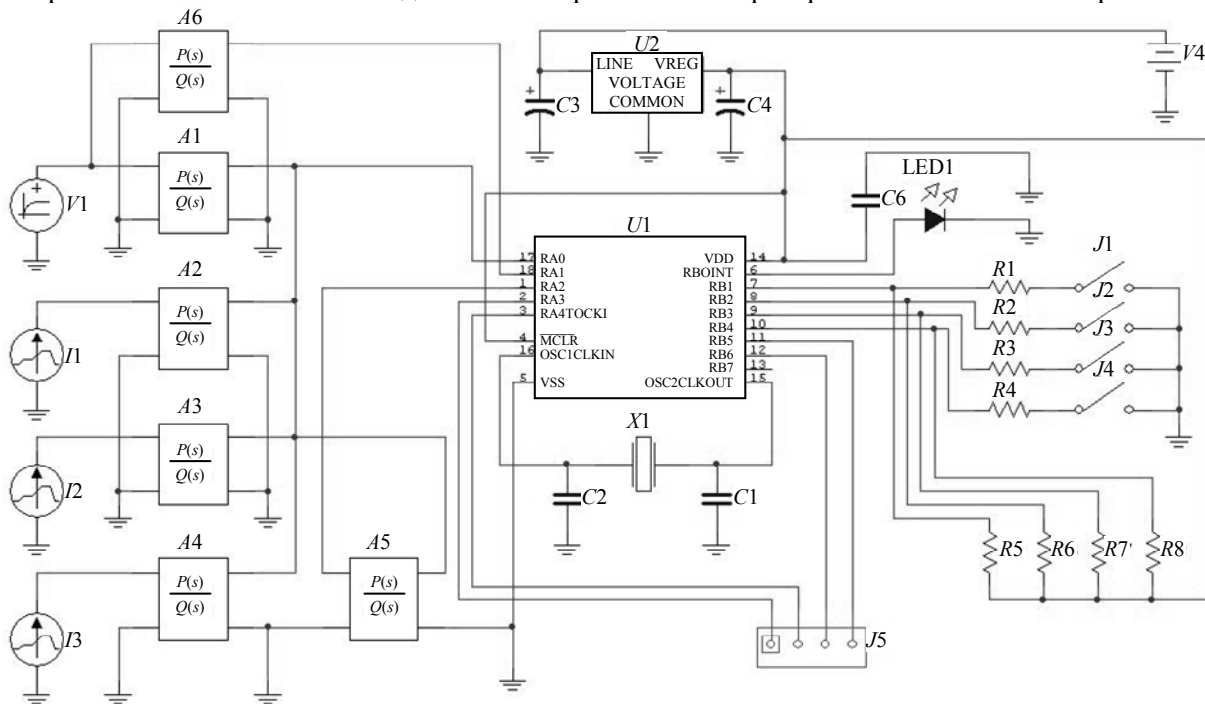


Рис. 1. Схемо-функциональная модель предлагаемого метода измерения одним мономорфным пьезокерамическим преобразователем

При воздействии на электроды пьезоэлемента нескольких физических величин  $F_1, \dots, F_m$  формируется сигнал  $U_{\text{вых}}$ , являющийся суммой откликов пьезоэлемента на воздействующие физические величины [4],

$$U_{\text{вых}}(t) = \sum_{n=1}^m A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \phi^n) + \xi(t), \quad (1)$$

где  $\phi^n = \phi_n + ((m+1) - n)\phi'$ ;

$A_n$  — амплитуда;

$f_n$  — частота;

$\phi_n$  — фаза;

$\phi'$  — фаза задержки;

$m$  — количество измеряемых физических величин;

$\xi(t)$  — помеха, образованная воздействием на преобразователь дестабилизирующего фактора  $F_{\text{пом}}$ .

Для измерения физических величин  $F_1, \dots, F_m$  и определения фазового смещения откликов пьезоэлемента на воздействие физических величин в опорном генераторе синтезируется сигнал  $U_{\text{оп}}$ , подаваемый на дополнительный электрод пьезоэлемента. Фазовое смещение позволяет определить участки спектра, соответствующие искомым сигналам.

Значение помехи, вызванной дестабилизирующим фактором  $F_{\text{пом}}$ , определяется с помощью блока датчиков и может быть исключено из выражения (1) как математическим путем, так и с помощью синтезированного сигнала  $U_{\text{ош}}$ , поданного через обратную связь на пьезоэлемент.

Выделение из суммарного сигнала искомым составляющих осуществляли с помощью математической обработки с использованием размещенного в корпусе датчика DSP-процессора. На первом этапе сигнал  $U_{\text{вых}}$  подвергался цифровой обработке, в результате которой был получен дискретный сигнал:

$$U_d = \sum_{k=1}^{K-1} \left( \left( \sum_{n=1}^m (A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \phi^n)) + \xi(t) \right) \cdot \delta(t - k \cdot \Delta t) \right), \quad (2)$$

где  $\delta(t)$  — дельта функция;

$k$  — количество дискретов;

$\Delta t$  — интервал дискретизации по времени.

Спектр дискретного сигнала  $S(\omega)$  определяли, подставив (2) в выражение для преобразования Фурье  $S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$  [5],

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{K-1} \left( \left( \sum_{n=1}^m (A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \phi^n)) + \xi(t) \right) \cdot \delta(t - k \cdot \Delta t) \right) \cdot e^{-j\omega t} dt.$$

Дальнейшая обработка полученного сигнала производилась помощью обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ). Используя решетчатую функцию, получили выражение для дискретного спектра

$$S(\omega) = \sum_{k=1}^{K-1} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{K-1} \left( \left( \sum_{n=1}^m (A_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \phi^n)) + \xi(t) \right) \cdot \delta(t - k \cdot \Delta t) \right) \cdot e^{-j\omega t} dt \cdot \delta(\omega - p \cdot \Delta\omega) \right),$$

где  $S_d(\omega)$  — дискретные отсчеты спектра на одном периоде повторения  $\omega = \left[ 0; \frac{2\pi}{\Delta t} \right]$ ;

$\delta(t), \delta(\omega)$  — дельта-функции по времени и по частоте;

$k, p$  — количество дискретов по времени и по частоте;

$\Delta t, \Delta\omega$  — интервалы дискретизации по времени и по частоте.

Используя выражение  $S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega$  [5] для ОДПФ, имеем

$$U_{\text{вых}}(t) = C \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{p=0}^{K-1} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{K-1} \left( \left( \sum_{n=1}^m (A_n \sin(2\pi f_n t + \phi^n)) + \xi(t) \right) \delta(t - k\Delta t) \right) e^{-j\omega t} dt \cdot \delta(\omega - p\Delta\omega) \right) e^{j\omega t} d\omega,$$

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 получили

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}}(t) &= C \sum_{p=0}^{K-1} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{K-1} \left( \left( \sum_{n=1}^m (A_n \sin(2\pi f_n t + \phi^n)) + \xi(t) \right) \delta(t - k\Delta t) \right) e^{-j\omega t} dt \cdot \delta(\omega - p \cdot \Delta\omega) \right) e^{j\omega t} d\omega = \\ &= C \sum_{p=0}^{K-1} S(p\Delta\omega) e^{j \cdot p \cdot \Delta\omega t}, \end{aligned}$$

где  $S(p \cdot \Delta\omega)$  — дискретный спектр  $S_d(\omega)$ .

Для проверки полученной математической модели проведено компьютерное моделирование с последующим натурным экспериментом. Теоретически полученная переходная характеристика мономорфного пьезокерамического преобразователя при измерении трех физических величин (моделирование проведено с помощью пакета Multisim 10.0) показана на рис. 2, а результаты разложения суммарного выходного сигнала на искомые составляющие — на рис. 3.

Для проведения экспериментальных исследований использовался пьезоэлемент в виде бруска из пьезокерамики ЦТС-19 размером 24×10×6 мм. В качестве DSP-процессора использо-

ван цифровой сигнальный процессор фирмы Analog Devices семейства Blackfin-BF-537, на котором базируется плата ADZS-BF537-STAMP. Измерения переходных характеристик производились осциллографом С1-55. Один из полученных результатов экспериментальных исследований (при измерении трех физических величин) показан на рис. 4.

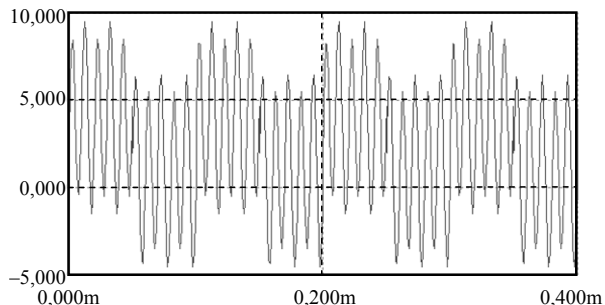


Рис. 2. Теоретическая зависимость переходной характеристики при измерении трех физических величин

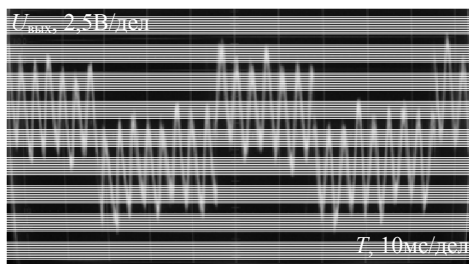


Рис. 4. Экспериментальная зависимость переходной характеристики при измерении трех физических величин

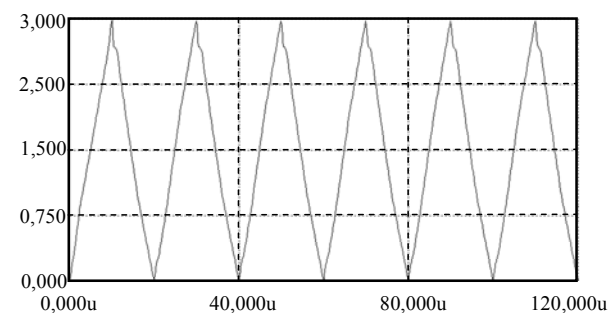
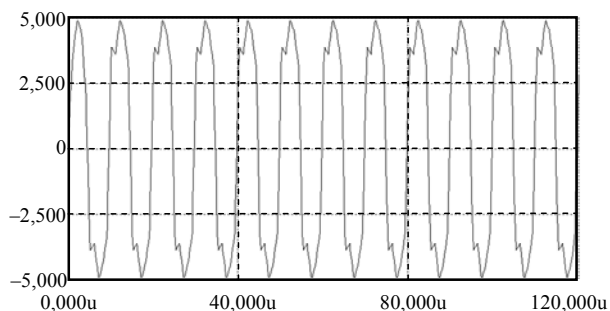
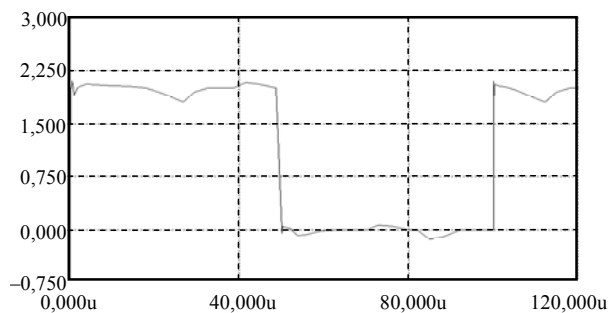


Рис. 3. Результаты разложения суммарного выходного сигнала на искомые составляющие

Как видно из рисунков 2 и 4, экспериментально полученные результаты с большой точностью совпадают с результатами теоретических исследований, что подтверждает эффективность предложенного метода 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. Разработано конструктивное исполнение пьезодатчика, позволившее 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, в результате чего появляется возможность измерения более двух физических величин одним чувствительным мономорфным пьезоэлементом

Предлагаемое конструктивное исполнение пьезодатчика позволяет производить процесс обработки информации до ее распространения по каналам передачи данных, а также осуществлять корректировку выходного сигнала с помощью обратных связей, подаваемых от процессора на пьезоэлемент. Все это позволяет существенно повысить точность измерения, в результате чего появляется возможность измерения более двух физических величин одним мономорфным пьезоэлементом. Быстродействие, стабильное энергопотребление, точность измерений позволило применить предложенный метод при разработке современных полисенсорных гетерогенных беспроводных пожаро-охранных систем.

### Литература

1. Шарапов, В.М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
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. пособие / А. Ф. Алейников, В. А. Гридчин, М. П. Цапенко. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. — 176 с.
4. Мусиенко, М. П. Метод измерения нескольких физических величин одним мономорфным пьезокерамическим преобразователем / М.П. Мусиенко, А.М. Коваленко // Системи обробки інформації: Зб. наук. праць. — Харків: Харківський ун-т повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 2011. — Вип. 8(98). — С. 98 — 101.
5. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник: [для студ. вуз., обуч. по спец. “Радиотехника”] / С.И. Баскаков. — 3-е изд., перераб, дополн. — М. : Высш. шк., 2000. — 408 с.

### References

1. Sharapov, V.M. Piezoelectricheskie datchiki [Piezoelectric Sensors] / V.M. Sharapov, M.P. Musienko, E.V. Sharapova. — Moscow, 2006. — 632 p.
2. Aleinikov, A.F. Mnogofunktsional'nye datchiki. [Multifunctional Sensors] / A.F. Aleinikov, M.P. Tsapenko // Izmereniya, kontrol', avtomatizatsiya [Measurement, Control, Automation]. — 1990. — № 2 (74). — P. 50 — 57.
3. Aleinikov, A.F. Datchiki (perspektivnye napravleniya razvitiya): ucheb. posob. [Sensors (Prospects for Development): Training Manual] / A.F. Aleinikov, V.A. Gridchin, M.P. Tsapenko. — Novosibirsk, 2001. — 176 p.
4. Musienko, M.P. Metod izmereniya neskol'kikh fizicheskikh velichin odnim monomorfnyim p'ezokeramicheskim preobrazovatelem. [The Method for Measuring Several Quantities by One Monomorphous Piezoceramic Transducer] / M.P. Musienko, A.M. Kovalenko // Sistemi obrobki informatsii: Zbirnik nauk. prats'[Information Processing Systems: Coll. sci. papers]. — Kharkiv, 2011. — № 8(98). — P. 98 — 101.
5. Baskakov, S.I. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: uchebnyk dlya stud. vuz., obuch. po spets. “Radiotekhnika” [Radiotechnical Circuits and Signals: Textbook for students of higher educational institutions on a speciality “Radio Engineering”] / S.I. Baskakov. — 3-e izd., pererab, dopoln. — Moscow, 2000. — 408 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Положаенко С.А.

Поступила в редакцию 30 августа 2012 г.