

**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПОЛИИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРИЗОВАННЫХ СИСТЕМ
НА БАЗЕ ОДНОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

**МЕТОД ПОБУДОВИ ПОЛІВИМІРЮВАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ
НА БАЗІ ОДНОГО П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА**

**METHOD OF CONSTRUCTION COMPUTERIZED POLYMEASURING SYSTEMS BASED
ON ONE PIEZOCERAMIC TRANSDUCER**

Аннотация. Работа посвящена повышению эффективности построения полиизмерительных компьютеризованных систем с одним монокристаллическим пьезопреобразователем. Предложен метод измерения нескольких физических величин одним монокристаллическим пьезопреобразователем за счет подачи на пьезоэлемент дополнительных электрических сигналов, количество которых равняется количеству измеряемых величин. Приведены результаты математического моделирования и экспериментального исследования.

Анотація. Робота присвячена підвищенню ефективності побудови полівимірювальних комп'ютеризованих систем з одним монокристаллическим п'єзоперетворювачем. Запропоновано метод вимірювання декількох фізичних величин одним монокристаллическим п'єзоперетворювачем за рахунок подачі на п'єзоелемент додаткових електричних сигналів, кількість яких дорівнює кількості вимірюваних величин. Наведено результати математичного моделювання та експериментального дослідження.

Summary. The article is devoted to increasing the efficiency of construction of polymeasuring computerized systems with one monocrystalline piezotransducer. Ultimately is offered the method of measurement a few physical quantities by one monocrystalline piezotransducer due to the filing of a piezoelement of additional electrical signals, the number of which are equal to the number of measured quantities. In the article are given the results of mathematical modeling and experimental study.

В настоящее время в измерительной технике наблюдается тенденция к все более широкому распространению пьезокерамических элементов. Благодаря своим уникальным свойствам пьезокерамические преобразователи широко применяются для измерения различных физических величин (силы, давления, ускорения, массы, угловых скоростей, момента, деформации, влажности, температуры и т. д.) [1]. При этом, как правило, каждый применяемый пьезоэлектрический преобразователь выполнен с использованием одного монокристаллического пьезоэлемента и измеряет только одну физическую величину. Когда же возникает необходимость измерения 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 во многих других случаях), используют преобразователи, которые представляют собой конструктивно объединенные в один корпус несколько чувствительных элементов [2, 3]. Однако в литературе отсутствует информация о том, что такое исполнение ведет к конструктивному усложнению датчика, увеличению массогабаритных показателей и прочее, что усложняет использование таких измерителей в местах с ограниченным пространством.

Целью данной статьи является разработка метода построения пьезокерамических преобразователей с одним чувствительным элементом, позволяющим измерять несколько физических величин. Достоинствами таких систем, по сравнению с системами с несколькими датчиками, является точность измерений, стабильное энергопотребление, наличие одного канала связи, простая диагностика и ремонтпригодность.

В процессе измерения нескольких физических величин одним монокристаллическим пьезокерамическим элементом формируется один выходной сигнал сложной формы. 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 прочее), которые вносят погрешность в процесс измерения. Для учета и 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.

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 в виду того, что площади поверхностей мономорфных пьезоэлементов занимают единицы квадратных 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 позволяет существенно повысить точность измерения, в результате чего появляется возможность измерения более двух физических величин, в отличие от схем-аналогов.

Предлагаемый метод построения полиизмерительных компьютеризованных систем на базе одного пьезокерамического преобразователя схематически показан на рис. 1

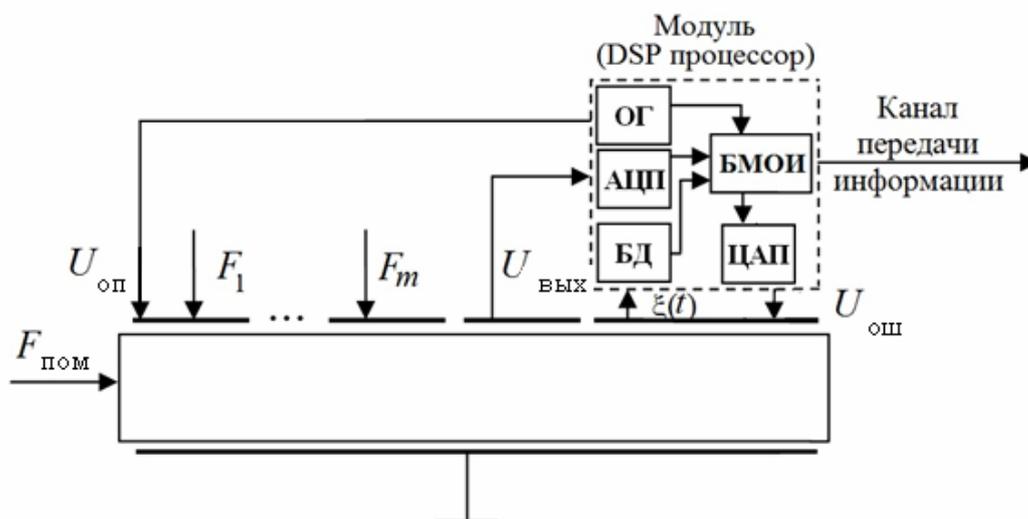


Рисунок 1 – Схема предлагаемого метода измерения одним мономорфным пьезокерамическим преобразователем:
 ОГ – опорный генератор; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;
 БД – блок датчиков; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
 БМОИ – блок математической обработки информации

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]:

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

где $\varphi^n = \varphi_n + ((m+1)-n)\varphi'$; 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 $F_{\text{пом}}$.

Для возможности измерения физических величин $F_1 \dots F_m$ и определения фазового смещения откликов пьезоэлемента на воздействие физических величин, в опорном генераторе синтезируется сигнал $U_{\text{оп}}$, который подается 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 :

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

где $\delta(t)$ – дельта функция; k – количество дискретов; Δt – интервал дискретизации по времени.

Спектр дискретного сигнала $S(\omega)$ вычисляли, подставив выражение для дискретного сигнала

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

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

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

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

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; Δt , $\Delta \omega$ – интервалы дискретизации по времени и по частоте.

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

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

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:

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

$$= C \sum_{p=0}^{K-1} S(p \cdot \Delta\omega) \cdot e^{j \cdot p \Delta\omega t} d\omega,$$

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

Для проверки полученной математической модели 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 с помощью пакета Mathcad 14.0).

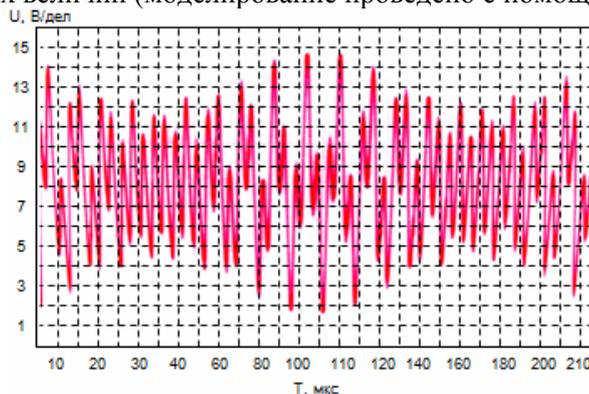


Рисунок 2 – Теоретическая зависимость переходной характеристики при измерении четырех физических величин

На рис. 3 приведены результаты разложения суммарного выходного сигнала на искомые составляющие.

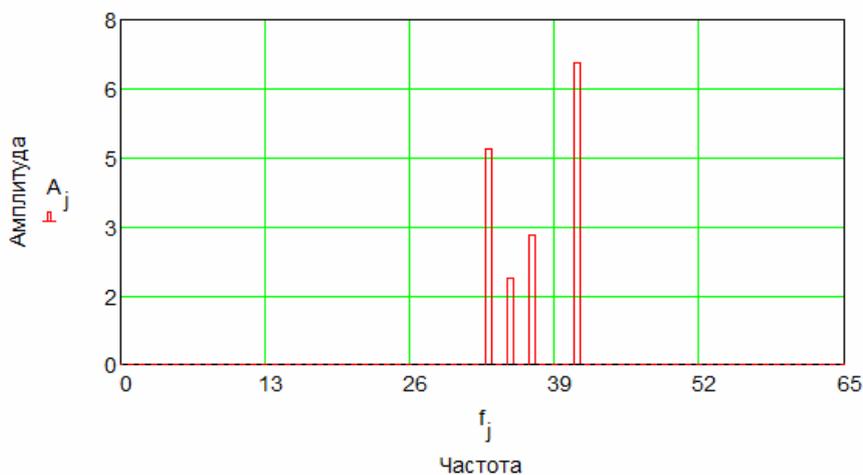


Рисунок 3 – Результаты разложения суммарного выходного сигнала на искомые составляющие

Для проведения экспериментальных исследований использовался пьезоэлемент в виде бруска из пьезокерамики ЦТС-19 размером 24×10×6 мм. В качестве DSP-процессора использован 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 четырех физических величин) показан на рис. 4.

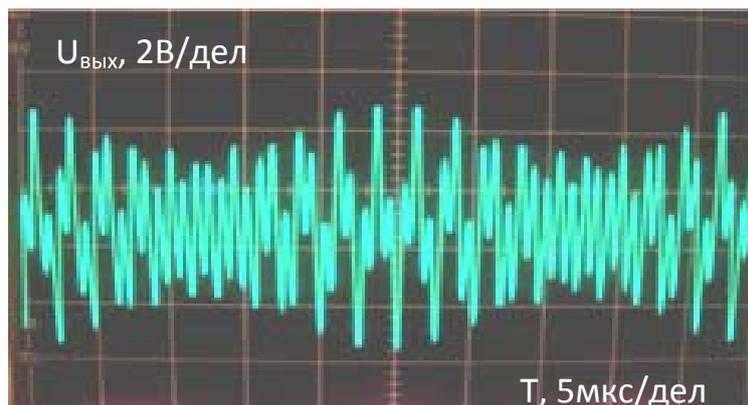


Рисунок 4 – Экспериментальная зависимость переходной характеристики при измерении четырех физических величин

Как видно из рис. 2 и 4, экспериментально полученные результаты с большой точностью повторяют результаты теоретических исследований, что подтверждает эффективность предложенного метода измерения нескольких физических величин одним мономорфным пьезокерамическим преобразователем. А 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.

В заключение отметим следующие выводы:

1. Применение разработанного метода построения полиизмерительных пьезокерамических преобразователей за счет подачи на пьезоэлемент дополнительных электрических сигналов, количество которых равняется количеству измеряемых величин, позволяет осуществлять измерение двух физических величин в одной точке исследуемого объекта, при этом время измерения уменьшается в два раза.
2. Предложенное применение одновременно положительной и отрицательной обратной связи позволяет в одной точке исследуемого объекта увеличить количество измеряемых величин до трех.
3. Разработанный метод измерения более трех физических величин с использованием цифрового сигнального процессора в измерительном канале позволяет повысить точность измерения физических величин с близкими значениями частот на 12 ... 15 %.

Литература

1. *Шарапов В. М.* Пьезоэлектрические датчики / Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с. – ISBN 996-7533-63-8.
2. *Алейников А. Ф.* Многофункциональные датчики [Текст] / Алейников А. Ф., Цапенко М. П. // Измерения, контроль, автоматизация. – 1990. – № 2 (74). – С. 50-57.
3. *Алейников А. Ф.* Датчики (перспективные направления развития) : учеб. пособ. / Алейников А. Ф., Гридчин В. А., Цапенко М. П. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 176 с.
4. *Мусиенко М. П.* Метод измерения нескольких физических величин одним мономорфным пьезокерамическим преобразователем / Мусиенко М. П., Коваленко А. М. // Системи обробки інформації: Зб. наук. праць. – Харків: Харківський ун-т повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 2011. – Випуск 8(98). – С. 98 – 101.
5. *Баскаков С. И.* Радиотехнические цепи и сигналы : учебник: [для студ. вуз., обуч. по спец. "Радиотехника"] / Баскаков С. И. – [3-е изд., перераб, дополн.]. – М. : Высшая школа, 2000. – 408 с.

