

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 681.586'326'773:53.088

DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-5

*К. И. Бастрьгин*СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ  
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА  
БЫСТРОПЕРЕМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ  
ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВИБРАЦИИ*K. I. Bastrygin*METHOD FOR COMPENSATING THE ERROR  
OF A PIEZOELECTRIC SENSOR OF A RAPIDLY  
CHANGING PRESSURE FROM THE EFFECTS  
OF TEMPERATURE AND VIBRATION

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Актуальность данной темы подтверждается повышенными требованиями к точности, надежности, стабильности метрологических характеристик, устойчивости к внешним воздействиям и расширенными условиями эксплуатации датчиковой аппаратуры со стороны современных систем контроля и управления техническими и производственными сложными изделиями. Целью работы является поиск и выбор конструкторских решений для снижения дополнительной погрешности пьезоэлектрического датчика давления. **Материалы и методы.** Изложены особенности построения пьезоэлектрического датчика быстропеременного давления для работы в системах измерения и мониторинга сложных объектов. Рассмотрены факторы, определяющие погрешность измерения быстропеременного давления. Проведен анализ амплитудно-частотной характеристики датчика. **Результаты.** Приведены схемотехнические решения, позволяющие скорректировать влияние внешних воздействующих факторов на датчик и достоверность показания изделия. **Выводы.** По результатам исследования представлена структура датчика, позволяющая скомпенсировать дополнительную погрешность от воздействия внешних факторов (температура от 196 до 800 °С и вибрации в диапазоне частот от 31,5 до 5000 Гц с ускорением до 4500 м/с<sup>2</sup>) до 0,5 %.

**Abstract. Background.** The relevance of this topic is confirmed by the increased requirements for accuracy, reliability, stability of metrological characteristics, resistance to external influences and extended operating conditions of sensor equipment from modern control and management systems for technical and production complex products. The aim of the work is to find and select design solutions to reduce the additional error of the piezoelectric pressure sensor. **Materials and methods.** The peculiarities of the construction of a piezoelectric sensor for high-speed pressure are described for working in systems for measuring and monitoring com-

plex objects. The factors determining the measurement error of the fast-changing pressure are considered. The analysis of the amplitude-frequency characteristic of the sensor is carried out. *Results.* Schematic solutions allowing to correct the influence of external factors affecting the sensor and the reliability of the product indication are given. *Conclusions.* Based on the results of the study, the structure of the sensor is shown that allows to compensate for the additional error caused by external factors (temperature from 196 to 800 °C and vibrations in the frequency range from 31,5 to 5000 Hz with acceleration up to 4500 m/s<sup>2</sup>) to 0,5 %.

**Ключевые слова:** датчик, быстропеременное давление, пьезоэлектрический узел, амплитудно-частотная характеристика, компенсация погрешности.

**Key words:** sensor, high-pressure pressure, piezoelectric unit, amplitude-frequency response, error compensation.

Повышение точности, надежности, стабильности метрологических характеристик, устойчивости к внешним воздействиям и расширение условий эксплуатации является необходимыми требованиями к датчиковой аппаратуре со стороны современных систем контроля и управления техническими и производственными сложными изделиями. В настоящее время возникла необходимость разработки датчика, предназначенного для измерения быстропеременных давлений при воздействии вибраций, ударов, линейных ускорений и широкого диапазона температур окружающей среды [1].

Выбор конструкторских и технологических решений пьезоэлектрического датчика давления осуществлялся из условия получения заданной точности измерений, высокой стабильности, надежности, чувствительности, помехоустойчивости при длительном ресурсе работы, минимизации влияния дестабилизирующих факторов, особенно температуры и вибрации, минимальной температурной погрешности, минимальных габаритов и массы, нормированного выходного сигнала [2].

Особое внимание уделялось специализированной электронной аппаратуре, обеспечивающей компенсацию погрешностей, вызванных влияющими внешними воздействующими факторами.

Конструктивно датчик представляет собой сборку двух блоков, а именно: первичного измерительного преобразователя (ПИП) и вторичного измерительного преобразователя (ВИП), соединенных между собой кабельной перемычкой [3].

Рассмотрим структуру сигнала, возникающего на выходе ПИП датчика быстропеременных давлений, находящегося в реальных условиях эксплуатации. Известно, что мгновенное значение выходного электрического напряжения  $U_{\text{вых}}$  ПИП описывается соотношением

$$U_{\text{вых}} = PK_p(f) + aK_a(f), \quad (1)$$

где  $P$ ,  $a$  – соответственно значения давления и виброускорения датчика быстропеременного давления, воздействующие на пьезоэлектрический чувствительный элемент (ПЧЭ) ПИП;  $K_p(f)$  – коэффициент преобразования (чувствительность) по давлению;  $K_a(f)$  – коэффициент преобразования по виброускорению.

Соответственно, измеряемое быстропеременное давление будет равно

$$P = \frac{U_{\text{вых}} - aK_a(f)}{K_p(f)} = \frac{U_{\text{вых}} - U_a}{K_p(f)}, \quad (2)$$

где  $U_a = aK_a(f)$  – напряжение на выходе ПИП, обусловленное наличием виброускорения  $a$ , воздействующего на ПЧЭ.

Как видно из соотношения (2), погрешность измерения мгновенных значений быстропеременного давления определяется погрешностью измерения вибрационной составляющей и погрешностью определения чувствительности по давлению.

С целью минимизации первого фактора в конструкцию датчика быстропеременного давления введен специальный дополнительный пьезоэлектрический узел (компенсирующий ПЧЭ), на который воздействует только вибрационная составляющая сигнала. Возникающее на

выходе этого компенсирующего ПЧЭ электрическое напряжение вычитается (с помощью пассивного сумматора) из  $U_{\text{вых}}$ , что предположительно в соответствии с формулой (2) должно обеспечить компенсацию вибрационной составляющей погрешности. Однако из-за фазового сдвига реализованная таким образом компенсация является неполной, поскольку на практике невозможно обеспечить равенство коэффициентов преобразования рабочего ПЧЭ ПИП датчика и вспомогательного пьезоэлектрического узла, измеряющего виброускорение. Очевидно, что операцию суммирования необходимо реализовывать после нормирования вибрационной составляющей сигнала. Следовательно, датчик быстропеременного давления в тракте виброкомпенсации должен иметь активное электронное устройство, выравнивающее вибрационные составляющие сигналов на выходе рабочего и компенсирующего ПЧЭ [4].

Второй фактор, определяющий погрешность измерения быстропеременного давления по формуле (2), имеет несколько составляющих, основные из которых:

- отклонение чувствительности  $K_p(f)$  от постоянной величины, обусловленное необходимостью измерений в широкой полосе частот, для которой резонансными свойствами датчика нельзя пренебречь;
- технологический разброс  $K_p(f)$ ;
- зависимость  $K_p(f)$  от времени и температуры.

Из представленных рассуждений следует, что для минимизации погрешностей измерения быстропеременного давления  $P$  в состав датчика необходимо ввести электронные узлы, реализующие следующие функции:

- компенсацию нелинейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ);
- компенсацию воздействия вибрации;
- компенсацию температурной зависимости чувствительности;
- коррекцию по амплитуде и частоте сигнала на выходе рабочего ПЧЭ;
- коррекцию по амплитуде и частоте сигнала на выходе дополнительного виброизмерительного узла (компенсирующего ПЧЭ);
- суммирование сигналов с рабочего и компенсирующего ПЧЭ;
- формирование на выходе датчика сигналов, соответствующих  $P$  и  $a$ .

Анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) первичного преобразователя показывает, что она подобна АЧХ высокодобротного звена второго порядка фильтра нижних частот. Подобные звенья используются при построении фильтров Чебышева более высоких порядков.

Данный факт подсказывает способ коррекции АЧХ ПИП путем дополнения ее звеньями фильтра Чебышева в количестве и качестве, необходимом и достаточном для получения результирующей АЧХ с заданной неравномерностью. Такие звенья активных фильтров первого и второго порядка достаточно легко реализуются, и их теория хорошо разработана. Достаточно широко распространены и компьютерные программы синтеза таких фильтров. Некоторая сложность заключается в том, что все известные нам методики проводят расчет всего фильтра в целом по заданным характеристикам, а в нашем случае одно звено фильтра уже задано в виде АЧХ ПИП. Расчеты показывают, что суммарный порядок, а соответственно, и количество звеньев фильтра определяются, в первую очередь, добротностью ПЧЭ ПИП и заданной результирующей неравномерностью [5, 6].

Например, для компенсации АЧХ ПЧЭ с добротностью до трех единиц с неравномерностью 1 дБ в полосе до  $0,7 F_p$  достаточно одного звена второго порядка. Увеличение добротности до десяти или снижение неравномерности до 0,3 дБ требует применения уже двух звеньев, второго порядка каждое. Это обстоятельство требует для реализации корректирующего устройства применять легко перестраиваемые электронные схемы, позволяющие быстро и легко формировать из них звенья с параметрами, требующимися для данного экземпляра ПЧЭ. Желательно обеспечить возможность программирования заданных характеристик в уже изготовленном устройстве.

В простейшем случае коррекция по амплитуде может реализовываться с помощью предварительных усилителей с управляемым коэффициентом передачи. Компенсация частотной зависимости  $K_p(f)$  требует применения более сложных аппаратных средств, построение которых вытекает из анализа АЧХ ПИП датчика.

Известно, что чувствительность датчика существенно зависит от температуры. В то же время известно, что эта зависимость достаточно стабильна. Поэтому возможна компенсация температурной зависимости введением мультипликативной поправки на изменение чувствительности путем внесения соответствующей поправки, взятой из зависимости (графика, таблицы) указанной поправки от температуры. Таблица составляется при испытаниях ПЧЭ. Таким образом, для осуществления температурной компенсации необходимы наличие таблицы поправок, знание текущего значения температуры ПЧЭ и соответствующие аппаратно-программные средства [7].

Определенную трудность представляет получение информации о текущей температуре ПЧЭ ПИП датчика, так как обычно ПЧЭ специальными термоэлектрическими преобразователями не оснащаются. Этот факт заставляет искать иные пути для измерения температуры.

Поскольку ПЧЭ представляет собой пьезоэлектрический преобразователь, емкость которого, как известно, так же, как и чувствительность, существенно зависит от температуры. Это означает, что если знать эту зависимость, то можно установить зависимость чувствительности ПЧЭ в соответствии с его емкостью и таким образом получить таблицу поправок чувствительности по текущим значениям его емкости.

Компенсация воздействия вибрации возможна, как уже было отмечено выше, при наличии в составе ПИП компенсирующего ПЧЭ, вырабатывающего так же, как и рабочий ПЧЭ, пропорциональный вибрации сигнал (рис. 1). Обычно фаза компенсирующего сигнала противоположна рабочему для удобства его использования. Необходимо учитывать, что чувствительность и выходное сопротивление компенсационного канала ПИП как правило отличаются от рабочего.

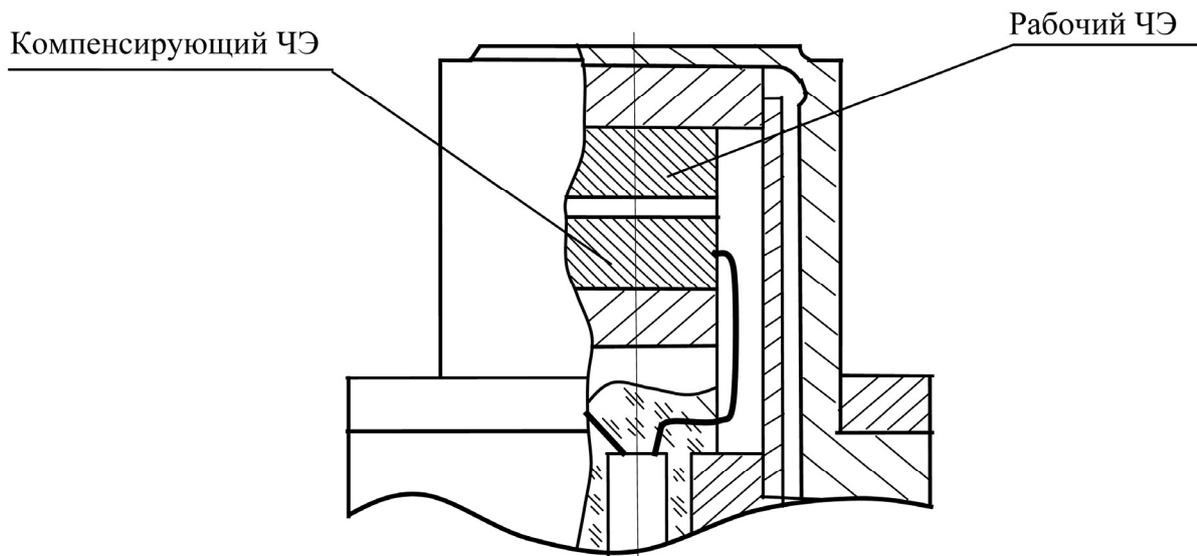


Рис. 1. Расположение рабочего и компенсирующего ЧЭ в корпусе первичного преобразователя

Следовательно, для осуществления компенсации воздействия вибрации модуль электронный должен, кроме усилителя рабочего канала, содержать еще и усилитель компенсационного канала с переменным коэффициентом передачи и сумматор.

Коэффициент передачи компенсационного канала должен быть таким, чтобы

$$M_{\text{в}} = K_{\text{р}}M_{\text{вр}} - M_{\text{вк}}K_{\text{к}} = 0, \quad (3)$$

где  $M_{\text{в}}$  – чувствительность датчика к вибрации;  $M_{\text{вр}}$  – чувствительность рабочего канала к вибрации;  $M_{\text{вк}}$  – чувствительность компенсационного канала к вибрации;  $K_{\text{р}}$  – коэффициент передачи усилителя рабочего канала;  $K_{\text{к}}$  – коэффициент передачи усилителя компенсационного канала.

Для качественной компенсации требуется и обеспечение фазового соотношения между сигналами, для чего может потребоваться и фазовая коррекция.

Входящий в состав датчика ВИП обеспечивает одновременную выработку сигналов, соответствующих уровню быстропеременного давления и уровню вибрации. Конструктивно ВИП выполнено в виде выносного блока с разъемами, обеспечивающими подключение ПИП датчика, напряжения питания и снятие выходного сигнала. Выходной сигнал с ВИП передается по двухпроводной линии связи и соответствует интерфейсу связи RS485 [3].

Оценка массогабаритных параметров и удобств настройки и эксплуатации показывает, что наиболее перспективным является использование современных цифровых методов обработки информации и построение электронной части (микропроцессорного блока) ВИП, имеющего структуру, представленную на рис. 2.

Предварительные аналоговые усилители (ПУ) обеспечивают согласование высокоомных выходов пьезоэлектрических преобразователей датчика и входов аналого-цифровых преобразователей (АЦП) цифровой части микропроцессорного блока.

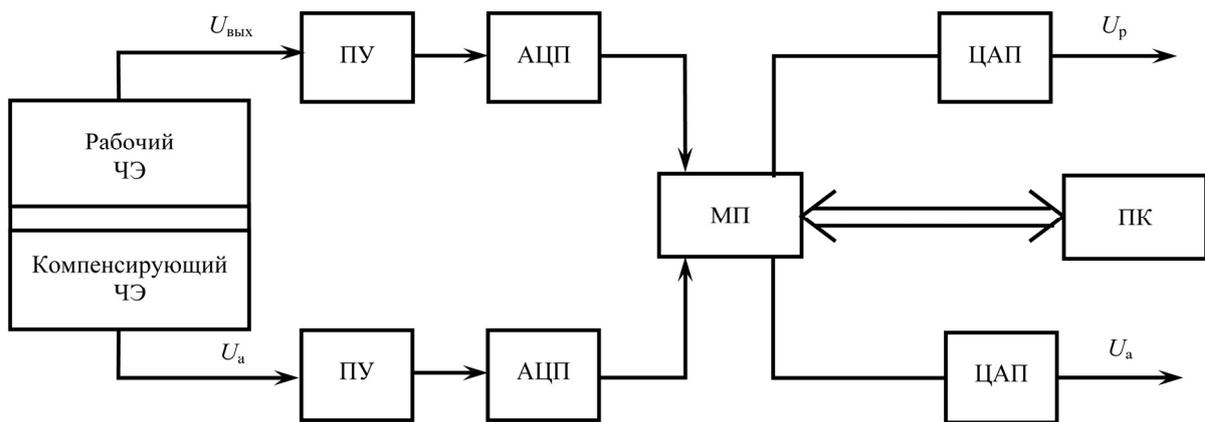


Рис. 2. Схема преобразователя датчика

Основные функции ВИП:

- прием, кодирование и ввод в процессор информации по основному рабочему и вспомогательному (вибрационному) каналам;
- ввод в процессор информации о конкретных величинах коэффициентов преобразования  $K_d(f)$  по каждому каналу;
- компенсация температурной зависимости чувствительности;
- реализация функции разделения информации о величинах пульсации давления и виброускорения;
- формирование на выходе микропроцессорного блока аналоговых сигналов, пропорциональных величинам давления и ускорения;
- отладка микропроцессорного блока в диалоговом режиме.

Введение в состав разрабатываемого датчика измерительного преобразователя позволит компенсировать воздействие паразитных влияющих факторов и тем самым существенно повысить достоверность оценки измеряемой величины. Появляются возможности проведения предварительной обработки сигнала, проведения спектрального анализа, фильтрации и выдачи его в сеть в кодовом виде [8].

При воздействии вибрации разноименные сигналы с рабочей и компенсирующей секции пьезокерамического пакета обрабатываются микропроцессором и компенсируются.

Результирующий (скомпенсированный) сигнал от воздействия быстропеременного давления через токосъемники, контакты гермоввода и кабельную перемычку подается на вход нормализующего преобразователя (ВИП).

Представленная структура разрабатываемого датчика позволит скомпенсировать дополнительную погрешность от воздействия внешних факторов (температура от 196 до 800 °С и вибрации в диапазоне частот от 31,5 до 5000 Гц с ускорением до 4500 м/с<sup>2</sup>) до 0,5 %, для сравнения: у датчиков, применяемых в составе измерительных систем сложных изделий в настоящий момент (ЛХ611АМ, Вт309 и т.д.), она доходит до 10 %.

*Библиографический список*

1. Дмитриенко, А. Г. Тенденции развития датчиковой аппаратуры и систем измерения, мониторинга, контроля и диагностики технически сложных объектов на ее основе / А. Г. Дмитриенко, В. И. Волчихин, А. В. Блинов, Е. А. Ломтев // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 6–12.
2. Бастрыгин, К. И. К вопросу коррекции температурной погрешности в пьезоэлектрических датчиках давления / К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2. – С. 25–30.
3. Бастрыгин, К. И. Высокотемпературный пьезоэлектрический датчик пульсации давления / К. И. Бастрыгин // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 76–81.
4. Бастрыгин, К. И. Исследования температурной стабильности кристаллов для создания высокотемпературных пьезоэлектрических датчиков динамического давления / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2015. – № 11. – С. 56–59.
5. Каудман, М. Практическое руководство по расчетам схем в электронике : справ. : в 2 т. / М. Каудман, А. Г. Сидман : пер. с англ. ; под ред. Ф. Н. Покровского. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – Т. 2. – 288 с.
6. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : пер. с англ. / П. Хоровиц, Ул. Хилл. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Мир, 1993. – Т. 1. – 413 с.
7. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк. – 12-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2017. – Т. 2. – 452 с.
8. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника : справочное руководство : пер. с нем / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.

***Бастрыгин Кирилл Игоревич***

начальник лаборатории,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: nik2@niifi.ru

***Bastrygin Kirill Igorevich***

head of laboratory,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.586'326'773:53.088

**Бастрыгин, К. И.**

**Способ компенсации погрешности пьезоэлектрического датчика быстропеременного давления от воздействия температуры и вибрации / К. И. Бастрыгин // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 32–37. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-5.**