

УДК 681.586.773: 53.088

К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот

К ВОПРОСУ О КОРРЕКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ

K. I. Bastrygin, V. V. Kikot

TO THE QUESTION ABOUT THE CORRECTION OF THE TEMPERATURE ERROR IN PIEZOELECTRIC PRESSURE SENSORS

А н н о т а ц и я. Рассмотрены варианты коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков давления за счет выбора материала пьезоэлемента, использования термоизоляции диафрагмы, изменения габаритно-массовых характеристик датчика, применения мембран различных модификаций, материалов с минимальными коэффициентами линейного расширения и использования интеллектуальных вторичных преобразователей.

A b s t r a c t. The variants of the temperature error correction piezoelectric pressure sensors, such as the choice of material piezoelectric element, the use of thermal insulation aperture, change dimensions and mass characteristics of the sensor, the use of membranes of various modifications, the use of materials with minimal coefficients of linear expansion and the use of intelligent secondary converters are presented.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчики давления, пьезоэлемент, температурная погрешность, мембрана.

К е у w o r d s: pressure sensors, piezoelectric element, temperature error, the membrane.

Пьезоэлектрические датчики давления часто применяются для измерения пульсаций давления в изделиях ракетно-космической техники, при испытаниях реактивных двигателей, в топливных системах и др.

Сравнительный анализ технических характеристик зарубежных приборов показывает, что отсутствуют малогабаритные высокоточные пьезоэлектрические датчики, работоспособные в диапазоне частот до 150 000 Гц при комплексном воздействии температур до 900 °С (без принудительного охлаждения), рабочем давлении до 250 МПа и обладающие повышенными ресурсом, надежностью и долговременностью [1].

Одним из условий, которое определяет конструкцию датчика быстропеременного и акустического давления, является характер изменения температуры рабочей среды.

При измерении давления рабочей среды с постоянной температурой значение температурной ошибки в информативном сигнале является постоянным.

При измерении давления рабочей среды с медленноменяющейся температурой основную погрешность вносит изменение характеристик кабельной перемычки от температуры.

В данном случае зависимость сигнала температурной ошибки – линейная, возрастает пропорционально увеличению длины кабеля (рис. 1).

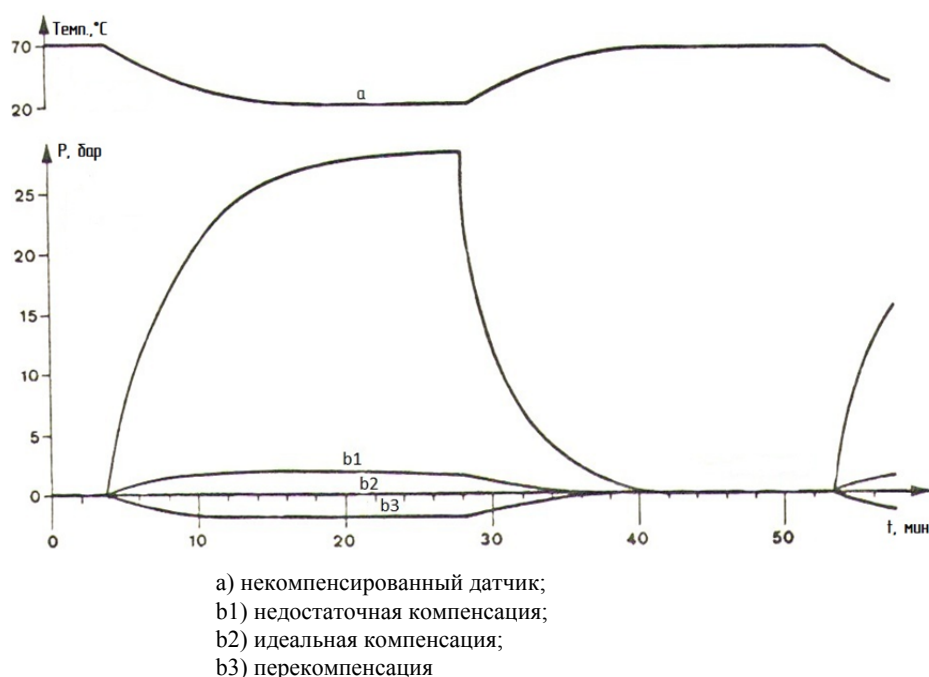


Рис. 1. Ошибки измерения давления при медленноменяющейся температуре

Основной задачей в этих случаях является лишь подбор типа соединительного кабеля кабельной перемычки для заданного температурного режима [2].

От диапазона температуры рабочей среды зависит и выбор материала пьезоэлемента. При диапазоне температур до 350 °С широко применяются монокристаллические кварцевые пьезоэлементы или пьезокерамические модули. Расширение температурного диапазона свыше 350 °С решается применением высокотемпературных монокристаллов, например турмалина, ниобата лития, однако датчики, созданные на основе этих пьезоэлементов, имеют небольшую стойкость к вибрации и ударам [1].

Скачкообразное изменение температуры происходит, например, во время подачи жидкого кислорода в топливную систему ракетного двигателя. Также влияние резких изменений температуры может быть продемонстрировано с помощью температурного перепада, возникающего при резком погружении датчика в ванну с холодным машинным маслом, а затем в ванну с разогретым маслом, и наоборот. Теплообменные процессы, наблюдающиеся при этом, происходят в соответствии с законами теплообмена между маслом и датчиком и с индивидуальной зависимостью выходного сигнала датчика от температуры.

При измерении давления рабочей среды со скачкообразным изменением температуры учитывается следующее: в первые секунды температурного скачка температурная компенсация невозможна, так как чувствительный и компенсирующий элементы нагреваются не одновременно. Первоначально прогревается (или охлаждается) корпус датчика, затем неравномерно нагревается мембрана и воздействует на пьезоэлемент с силой, пропорциональной деформации от температурного скачка. Затем прогревается внутренний корпус, в котором находятся пьезоэлемент и компенсирующие элементы. В свою очередь пьезоэлемент нагревается и уменьшает предварительную нагрузку. Когда температуры всех элементов датчика выравняются, компенсация становится действенной (рис. 2) [2].

Динамическая составляющая температурной погрешности также может быть уменьшена, если использовать термоизоляцию или увеличить массу датчика.

На рис. 3 показано положение датчика в адаптере, имеющем массу, большую, чем масса самого датчика. Узкое цилиндрическое пространство между датчиком и адаптером служит в качестве термоизоляции, в то время как сама масса (за счет увеличения времени нагрева датчика) снижает температуру корпуса датчика [2].

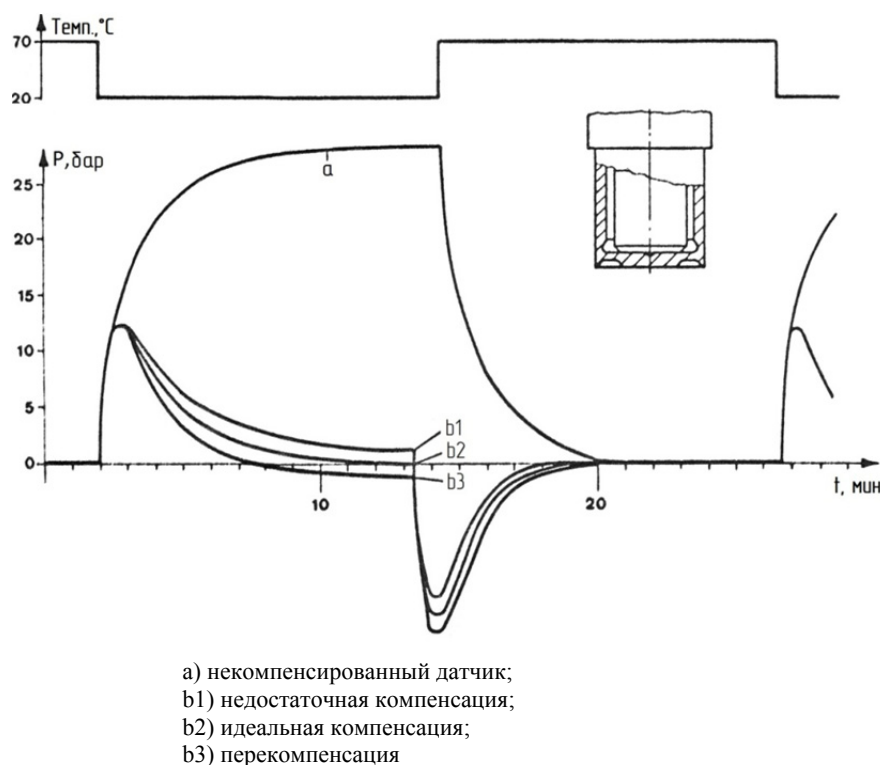


Рис. 2. Ошибки в показаниях датчика давления, подвергнувшегося воздействию температурного скачка

Например, пьезоэлектрический датчик давления СР-103 (фирма «Vibrometer») на базе кристаллического пьезоматериала VC-2 работоспособен при температуре $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ без принудительного охлаждения (и до $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$ кратковременно), но максимальное давление датчика не превышает 100 кгс/см^2 , собственная частота не превышает 100 кГц , масса датчика составляет 310 г [1].

Из рис. 3 видно, что повышение массы датчика и введение в конструкцию элементов термоизоляции значительно снижают влияние температурного скачка, но отрицательно сказываются на габаритно-массовых характеристиках датчика.

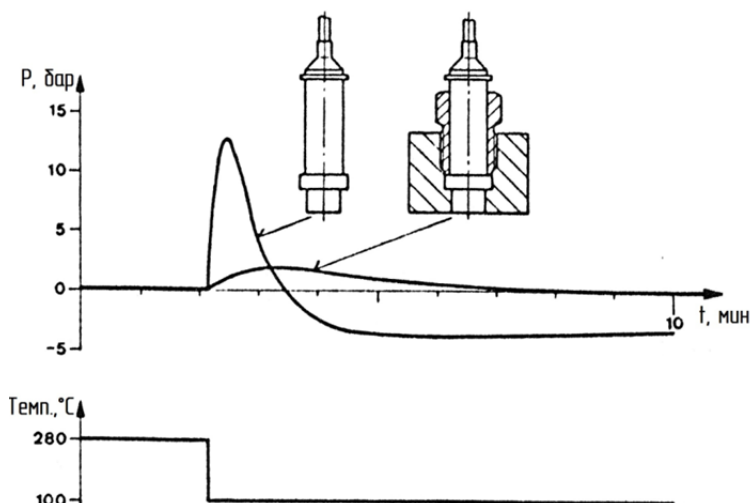


Рис. 3. Влияние термоизоляции на показания датчика, подвергнувшегося воздействию температурного скачка

Быстропеременная температура обычно присутствует во время всякого рода взрывов: при выстреле артиллерийского орудия, запуске ракетного двигателя и др. Даже кратковременный скачок температуры нагревает поверхность мембраны. Нагрев мембраны ведет к появлению механических напряжений в ней. Напряжения мембраны вызывают ее деформацию. Де-

формации мембраны достаточно для создания силы, воздействующей на пьезоэлемент. В выходном сигнале первичного преобразователя появляется ошибка от быстрого изменения температуры [2].

На практике существуют только два метода, позволяющие компенсировать ошибку первичного преобразователя от быстропеременной температуры: термоизоляция диафрагмы и применение мембран различных модификаций.

Термоизоляция диафрагм применена, например, в образцах модели 603 В («Kistler»). Для устранения дрейфа, вызываемого термоударом, мембрана покрывается тонким слоем кремнийорганической резины, обладающей хорошими термоизоляционными свойствами, но не предназначенной для работы в агрессивных средах [1].

В образцах той же фирмы модели 6201 В перед мембраной ставится теплозащитная пластина из асбестовой ткани, которая пропитана маловязким маслом. Данный способ защиты мембраны наиболее эффективен по сравнению с предыдущим, однако также не обеспечивает работу в агрессивных средах [1].

На мембрану датчиков 118А («PCB Electronics Inc») методом плазменного распыления нанесено покрытие из керамики, стойкое в агрессивных средах. Однако подобный путь решения имеет недостатки: покрытие обладает большой жесткостью, которая приводит к уменьшению чувствительности и усложнению технологии изготовления датчика [1].

При использовании мембран различных модификаций используются обычно три варианта с различными вариациями каждого из них:

- тонкая плоская пластина, изготовленная за одно целое с корпусом (для измерения высоких давлений);
- тонкая плоская пластина, соединенная с корпусом с помощью сварки (для измерения давлений при резких перепадах температур);
- мембрана в виде поршня (для увеличения ресурса датчика при измерении высоких давлений при температурах до 500 °С) [2].

Кроме рассмотренных выше конструктивных способов коррекции температурной погрешности первичных измерительных преобразователей, особый интерес представляют и схемотехнические варианты решений.

Например, вариацией емкости нагрузки можно минимизировать температурные погрешности датчиков в определенном интервале температуры. Но в этом случае требуется, чтобы зависимость коэффициента преобразования пьезоэлемента (а не всего датчика) от температуры соответствовала определенному расчетному соотношению. В расчет не принимаются факторы, связанные с взаимодействием элементов конструкции датчика (скольжение деталей, деформация клеевой прослойки и др.) [3].

Также, например, подбором при проектировании датчика материалов с минимально различными температурными коэффициентами линейного расширения можно добиться уменьшения температурной погрешности, но на практике возможность выбора материалов сильно ограничена.

Также в настоящее время широко применяются интеллектуальные вторичные преобразователи. С помощью программного обеспечения в них реализовывается требуемый алгоритм обработки и коррекции сигнала датчика. Например, датчик быстропеременных давлений ДПС 020 и датчик акустических давлений ДХС 521 производства ОАО НИИФИ, в состав которых входит вторичный интеллектуальный преобразователь, можно откалибровать и перенастроить на требуемый диапазон измерения, выбрать цифровой или аналоговый выходной сигнал и др. [4].

Интересным для исследования и реализации является коррекция температурной погрешности с использованием чувствительного элемента датчика давления для измерения и давления, и температуры. При таком способе коррекции температура и давление рабочей среды измеряются в одной точке и в одно время.

Поставленная цель достигается тем, что при настройке устройства определяется зависимость коэффициента преобразования датчика от температуры рабочей среды. Затем значения коэффициента преобразования для каждого значения температурного диапазона рабочей среды заносятся в память микроконтроллера интеллектуального вторичного преобразователя.

Например, на рис 4,а показаны экспериментальные данные относительного изменения коэффициента преобразования от температуры модулей ПМ-2, ПМ-3 и созданных на их основе датчиков Вм 306, Вм 307, Вм 308 производства ОАО НИИФИ [3].

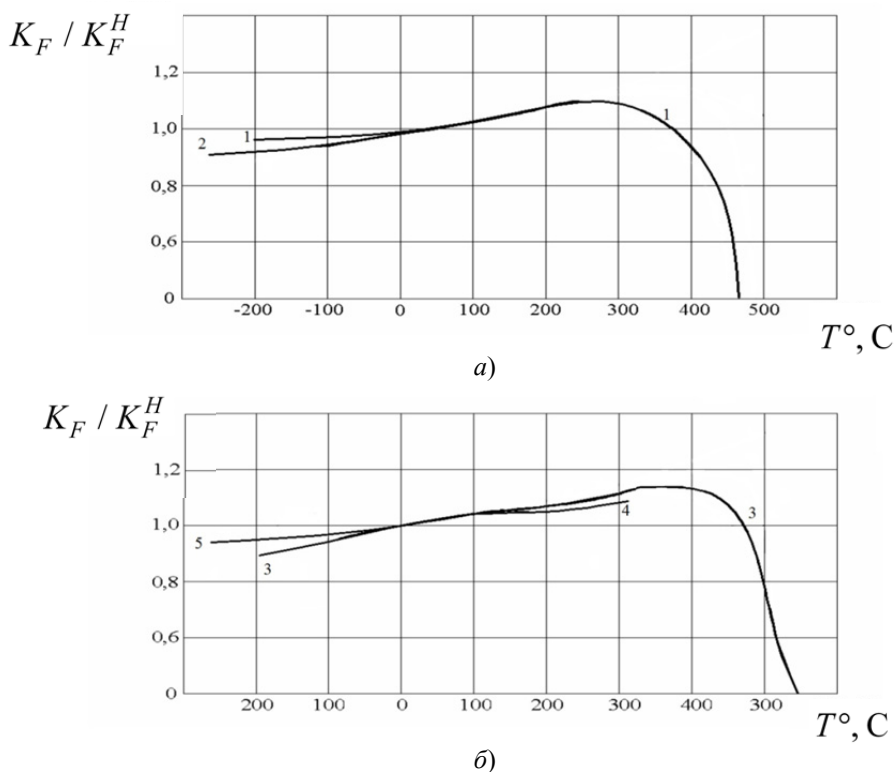


Рис. 4. Относительные температурные изменения коэффициента преобразования модулей ПМ-2 (1), ПМ-3 (2), датчиков Вм307 (3), Вм308 (4), Вм306 (5), выполненных на их основе

Во время измерения параметров процесса первичный преобразователь измеряет одновременно давление и температуру рабочей среды. И на основании полученной при настройке датчика зависимости коэффициента преобразования датчика от температуры микроконтроллер корректирует температурную ошибку измерения давления рабочей среды.

На рис. 5 представлен вариант схемы коррекции температурной погрешности. Пьезоэлемент первичного преобразователя показан в виде эквивалентной схемы [5].

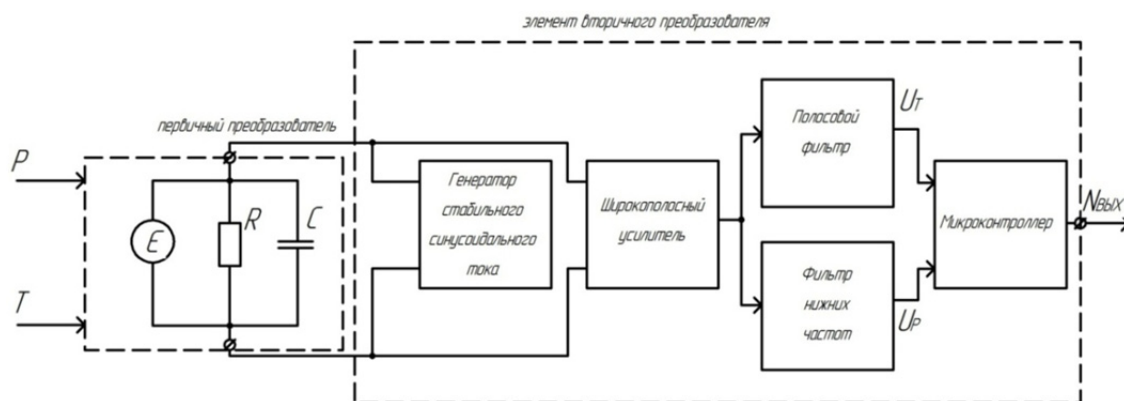


Рис. 5. Способ коррекции температурной погрешности

На первичный преобразователь датчика воздействует среда с давлением P , частотой изменения давления в диапазоне от $f_{\min}$ до $f_{\max}$ и температурой T с заданным диапазоном изменения.

В датчике применено частотное разделение сигналов о давлении и температуре. Информация о давлении рабочей среды получается на частотах от $f_{\min}$ до $f_{\max}$, а информация о температуре рабочей среды – на частотах больше $f_{\max}$.

Изменение давления P вызывает появление заряда на пьезоэлементе первичного преобразователя.

При изменении температуры T меняются диэлектрические свойства пьезоэлемента, а именно меняется емкость. Кроме того, меняется активное сопротивление пьезоэлемента [3].

Зависимость активного сопротивления пьезоэлемента от температуры T используется для измерения температуры T [6].

С генератора стабильного синусоидального тока на пьезоэлемент датчика подается напряжение с частотой $f_T > f_{\max}$.

Информация о давлении P и температуре T , усиленная широкополосным усилителем, поступает на вход полосового фильтра с полосой пропускания более $f_{\max}$, в котором из общего сигнала о давлении P и температуре T отфильтровывается сигнал только о температуре U_T , и на фильтр нижних частот с полосой пропускания менее $f_{\max}$, в котором из общего сигнала о давлении P и температуре T отфильтровывается только информация U_P о давлении P . Затем сигналы о давлении U_P и о температуре U_T поступают на вход микроконтроллера. В нем производится требуемая обработка полученной информации, в информацию о давлении P вносятся коррекция ошибки от воздействия температуры T и преобразование скорректированной информации о давлении P в выходной код $N_{\text{вых}}$, который поступает на выход микроконтроллера.

Реализация такого метода позволит повысить точность измерения не только проектируемых, но и уже созданных пьезоэлектрических датчиков давления, особенно в условиях воздействия быстропеременных температур. Это положительно скажется на габаритно-массовых характеристиках систем телеметрии, так как позволит отказаться от части датчиков температуры, которые используются для коррекции температурной ошибки. Преимуществом такого метода коррекции является также отсутствие в датчике давления дополнительного чувствительного элемента для измерения температуры.

Метод коррекции ошибки от влияния температуры рабочей среды с измерением давления и температуры рабочей среды одним чувствительным элементом пьезоэлектрического датчика давления, изложенный выше, требует детального изучения и будет подробно рассмотрен в отдельной статье.

Список литературы

1. Каталоги продукции. – 2013: PCB Piezotronics Inc. – URL: <https://www.pcb.com>; Dytran Instruments Inc. – URL: <https://www.dytran.com>; Endevco. – URL: <https://www.endevco.com>; Columbia Research Laboratories Inc. – URL: <https://crlsensors.com>.
2. Martini, K. R. New range of High-Temperature Quartz Pressure Transducers / K. R. Martini // Transducer'77 Conference. – London, 1977. – P. 4–14.
3. Богуш, М. В. Влияние температуры на коэффициент преобразования пьезоэлектрических датчиков / М. В. Богуш // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 2. – С. 26–39.
4. Каталог продукции ОАО НИИФИ. – Пенза : ОАО НИИФИ, 2013.
5. Левшина, Е. С. Электрические измерения неэлектрических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 114 с.
6. А. с. SU 1758456 A1. Устройство для измерения давления / А. Ф. Алейников. – Опубл. 17.02.1992.

Бастрыгин Кирилл Игоревич

инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: nik2@niifi.ru

Bastrygin Kirill Igorevich

electronics engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements

Кикот Виктор Викторович

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: nik2@niifi.ru

Kikot Viktor Viktorovich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements

УДК 681.586.773: 53.088

Бастрыгин, К. И.

К вопросу о коррекции температурной погрешности в пьезоэлектрических датчиках давления / К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 25–30.