

## Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков давления для изделий космической техники

В. П. Маланин<sup>1</sup>, В. В. Кикот, П. Н. Ефимов

<sup>1</sup>к. т. н., АО «Научно-исследовательский институт физических измерений», Россия

e-mail: ait@pnzgu.ru, inbox@post.su, nik2@niifi.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы коррекции температурной погрешности пьезодатчиков давления в условиях воздействия нестационарных температур и термоудара. Отмечается, что при работе пьезодатчиков давления в условиях термоудара для устранения влияния градиента температур важным является измерение пьезоэлементом основного параметра — давления и воздействующей на пьезоэлемент температуры в одной точке пространства и в одно время, что затрудняет применение дополнительных датчиков для измерения температуры рабочей среды. Для этого предлагается в пьезодатчике давления использовать параметры импедансов рабочего и виброкомпенсирующего пьезоэлементов в качестве источников информации о температуре пьезоэлементов.

Приведена структурная схема вторичного преобразователя выходных сигналов рабочего и виброкомпенсирующего пьезоэлементов пьезодатчика, ее описание и алгоритм получения сигналов коррекции.

Из результатов исследований следует, что изменение коэффициента преобразования пьезодатчика давления с пьезоэлементами из пьезоматериала ЦТС-83Г в диапазоне от  $-180$  до  $+200$  °C составляет примерно 35 %. Приведены временные зависимости выходных сигналов с рабочего и виброкомпенсирующего пьезоэлементов пьезодатчика давления при воздействии на него термоудара жидким азотом. Показано, что при использовании предлагаемого способа коррекции погрешности от воздействия нестационарной температуры рабочей среды можно уменьшить погрешность измерения динамического давления от термоудара.

**Ключевые слова:** датчики давления, пьезоэлемент, температурная погрешность, мембрана, эквивалентная схема, комплексное сопротивление, коэффициент преобразования

## The Correction of Temperature Error of Pressure Piezoelectric Sensors for Space Technology Products

V. P. Malanin<sup>1</sup>, V. V. Kikot, P. N. Efimov

<sup>1</sup>candidate of engineering science,

Joint-Stock Company "Research institute of physical measurements", Russia

e-mail: ait@pnzgu.ru, inbox@post.su, nik2@niifi.ru

**Abstract.** The article presents the questions of correction of temperature error of piezoelectric pressure sensors in conditions of transient temperature and thermal shock. It is noted that when the piezoelectric pressure sensor is operating in thermal shock conditions, it is important to measure the main parameter by means of the piezoelectric sensor: the pressure and piezoelectric element temperature at a single point of space and at the same time to eliminate the influence of the temperature gradient. That makes difficult to use additional sensors to measure the temperature of operating environment. It is proposed to use the impedance parameters of working and vibrocompensation piezoelectric elements as information source about the temperature of piezoelectric elements. The scheme of secondary transmitter of output signals of working and vibrocompensation piezoelectric elements is presented; its description and algorithm for obtaining the correction signals are described. The results showed that the change of the conversion efficiency of the pressure piezoelectric sensor of the piezoelectric elements form the PZT-83G piezoelectric material in the range of  $-180$  to  $+200$  °C is approximately 35 %. Moreover, time dependence of output signals from the working and vibrocompensation piezoelectric elements of the pressure piezoelectric sensor when exposed by thermal shock of liquid nitrogen is presented. It is shown that using the proposed correction method of measurement errors from the transient temperature of operating environment can reduce measurement error of dynamic pressure from the thermal shock.

**Key words:** pressure sensors, piezoelectric element, temperature error, membrane, equivalent circuit, impedance, conversion efficiency

Основу систем автоматического управления для космической техники составляют датчики, воспринимающие не только информацию об измеряемой величине, но и воздействие широкого спектра влияющих факторов, сопровождающих их эксплуатацию в так называемых жестких условиях. Датчиковая аппаратура, применяемая для этих целей, подвергается наиболее сосредоточенному и комплексному воздействию дестабилизирующих факторов, таких как перепад давлений, высокие уровни вибрационных и ударных нагрузок, воздействие акустических шумов, нестационарные температуры рабочих сред, термоудары. Влияние на метрологические характеристики датчиков быстропеременных и акустических давлений нестационарных криогенных температур, которые воздействуют на чувствительные элементы первичных преобразователей пьезоэлектрических датчиков, является одним из важнейших факторов, который определяет возможность применения этих датчиков в каждом конкретном случае.

Развитие и совершенствование методов коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков являются задачами многих организаций, разрабатывающих авиационную и космическую технику, так как отличительная особенность эксплуатации датчиковой аппаратуры в этих отраслях — воздействие на датчики нестационарных температур. Первичное преобразование динамических давлений при мощном и быстроизменяющемся температурном воздействии в диапазонах от  $-253$  до  $+300$  °C вызывает температурные переходные процессы в датчиках и, как следствие, возрастание погрешностей измерений динамических входных неэлектрических величин во время переходных процессов. В пьезоэлектрических датчиках в условиях воздействия термоудара переходные процессы могут длиться в зависимости от конструктивных особенностей отдельного датчика от единиц секунд до десятков минут. Обеспечение стабильности и точности измерения динамических давлений в течение этого времени является серьезной и актуальной проблемой. К настоящему времени исторически сформировались два общеизвестных метода снижения температурных погрешностей датчиков. Первый основан на уменьшении мощности воздействующего дестабилизирующего

фактора, а второй — на уменьшении чувствительности метрологических характеристик датчика к температуре.

В литературе [1–3] приведен поиск соотношения между универсальностью применения, надежностью создаваемых датчиков и их метрологическими характеристиками. Стремление к универсальности, например, накладывает ограничения на метрологические характеристики, вследствие чего усложняется эксплуатация датчиков из-за необходимости применения дополнительных конструктивных элементов (отводящих трубопроводов для уменьшения температуры рабочей среды, дополнительных штуцерных переходников, использование конструкций с промежуточной термостатированной средой, посредством которой воспринимается давление), а также из-за необходимости дополнительной настройки датчика на требуемый диапазон измерения динамических давлений и др. Особенностью в данном случае также является не проектирование датчиков для систем, а наоборот, проектирование систем для датчиков. Если же основные цели — повышение надежности и улучшение метрологических характеристик датчиков, то, например, для разных точек измерения динамических давлений в устройстве с контролируемыми параметрами рабочей среды могут использоваться датчики различных конструкций и способов преобразования, способствующие достижению наилучших метрологических характеристик и высокой надежности. Различные задачи проектирования датчиков и варианты их решения позволили сформировать научно-технический задел конструктивных решений, который используется в настоящее время.

Следует учитывать и взаимное влияние конструктивных элементов, чьи физические и электрические параметры изменяются при изменениях температуры рабочей среды. Например, термоупругие перемещения в корпусе датчика и в сопряженных с ним элементах, отличия в изменениях геометрических размеров из-за разных температурных коэффициентов линейных расширений материалов элементов датчика, напряжения и деформации в материале мембраны, пьезоэлектрические эффекты в пьезоэлементе датчика — это только немногие следствия воздействия изменений температуры рабочей среды. Общеизвестными вариантами конструктивных

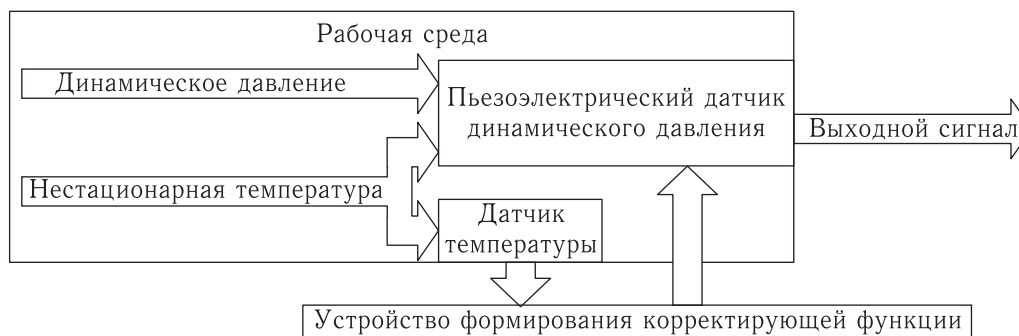


Рис. 1. Структура пьезоэлектрического датчика динамических давлений с датчиком температуры

решений для уменьшения воздействий температуры на точность измерений динамических давлений являются, например:

1) увеличение массы датчика для компенсации воздействия термоудара, недостатком такого решения является увеличение массы датчика и снижение быстродействия измерения;

2) покрытие мембраны датчика слоем кремнийорганической резины, керамики или установка перед мембраной асбестовой ткани, пропитанной маслом с малой вязкостью, что сказывается на чувствительности датчика;

3) применение мембран различных модификаций.

Например, при измерении высоких давлений применяется мембрана в виде тонкой пластины, которая изготавливается заодно с корпусом датчика, но при таком решении обычно применяется или крепление без резьбы в точке установки датчика, или дополнительный внешний установочный корпус для того, чтобы исключить косвенное влияние момента затяжки на метрологические характеристики датчика. При эксплуатации датчиков при воздействии термоударов применяется мембрана в виде тонкой пластины, которая соединяется с корпусом датчика с помощью сварки, но при длительной эксплуатации датчика в ряде агрессивных сред сварное соединение не обеспечивает достаточную надежность. Для увеличения ресурса датчиков при измерении высоких давлений при температурах до 800 °С применяются мембраны в виде поршней, но еще один силовопередающий элемент конструкции снижает чувствительность датчика.

Одним из конструктивных вариантов уменьшения мощности воздействия температуры на датчи-

ки динамических давлений также является термостатирование, которое может быть осуществлено, например, путем введения в конструкцию датчика возможности принудительного охлаждения с использованием каналов в корпусе датчика для прохождения охлаждающей жидкости. Термостатирование обеспечивает наилучшую температурную стабильность среди пьезоэлектрических датчиков, но малый диапазон рабочих температур, относительно большие габаритные размеры и энергопотребление ограничивают применение таких датчиков.

Термокомпенсация также является общепризнанным методом схемной коррекции температурной погрешности. При термокомпенсации, в отличие от термостатирования, используется сформированное компенсирующее воздействие на выходной сигнал датчика при воздействии дестабилизирующего фактора — температуры, которое воздействует так, что изменения выходного сигнала от изменений температуры стремятся к нулю. Типичные структуры термокомпенсированного пьезоэлектрического датчика динамических давлений представлены на рис. 1 и 2.

При измерениях динамических давлений с использованием канала измерения температуры рабочей среды датчик температуры может устанавливаться отдельно от датчика динамических давлений. При использовании такого расположения датчика температуры на точности измерений давлений сказываются отличия температур в точке измерения давлений и в точке измерения температуры, а также различные при термоударе скорости изменений температуры чувствительного элемента, датчика температуры и чувствительного элемента датчика динамических давлений. Быстродействие

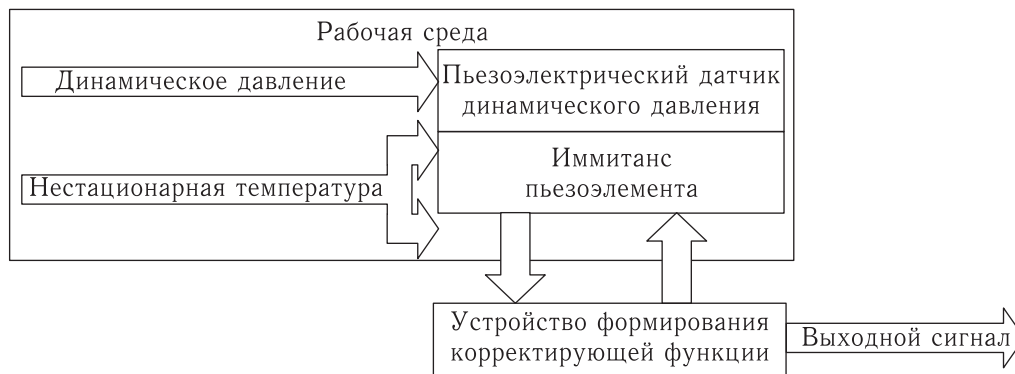


Рис. 2. Структура пьезоэлектрического датчика динамических давлений без датчика температуры, с использованием для измерения температуры иммитанса пьезоэлемента

датчиков температуры определяется их постоянной времени и, в зависимости от модели датчика, составляет от 0,05 до 20 с, в то время как длительность переходных процессов в датчиках динамического давления, в том числе длительность изменения температуры их пьезоэлементов, как было указано выше, может достигать десятков минут. По этим причинам уменьшается точность измерения динамического давления, усложняются определение и схемная реализация корректирующей функции, также увеличиваются трудозатраты на предварительную настройку измерительной системы перед эксплуатацией.

Применение схемных методов уменьшения влияний температурных воздействий лишено недостатков, присущих конструктивным и технологическим методам. Развитие технологий создания нано- и микроэлектромеханических систем, миниатюризация конструкций чувствительных элементов датчиков, а также электрических цепей вторичных преобразователей сделали возможным совместное применение схемных и конструктивных методов при проектировании датчиков, позволили создавать принципиально новые конструкции датчиков и систем управления. Этому также способствует появление новых пьезоэлектрических материалов, таких как лангитат, лангасит, которые способны выдерживать высокие температурные нагрузки. Например, стало возможным размещение датчиков динамических давлений и температуры, а в необходимых случаях и электрических цепей вторичных преобразователей этих датчиков в одном корпусе. При этом улучшаются габаритно-массовые показа-

тели измерительных систем, в состав которых эти датчики входят. Преимуществом данного варианта расположения датчика температуры является измерение температуры и динамических давлений в одной точке, без пространственного разделения каналов для их измерения. На точности измерения давлений в этом случае косвенно сказываются отличия в зависимостях физических параметров материалов элементов датчиков от температуры.

Еще одним перспективным методом коррекции температурной погрешности измерения динамического давления стал метод использования параметров пьезоэлемента для измерения температуры — импедансный анализ пьезоэлементов. Например, зависимость электрической емкости пьезоэлемента датчика динамического давления от температуры используется для формирования сигнала коррекции температурной погрешности. В частности, для измерения температуры может быть использована зависимость падения амплитудного значения напряжения высокочастотного токового сигнала на комплексном сопротивлении пьезоэлемента датчика, однозначно зависящем от температуры. При эксплуатации датчика измеряемые текущие значения указывают на его температуру и величину поправки на изменение его чувствительности от температуры. Практической реализацией работ в этом направлении стало разработанное авторами устройство коррекции температурной погрешности пьезоэлемента [3], структурная схема которого приведена на рис. 3. При использовании этого метода коррекции на основе импедансного анализа пьезоэлемента достигается ряд преимуществ:

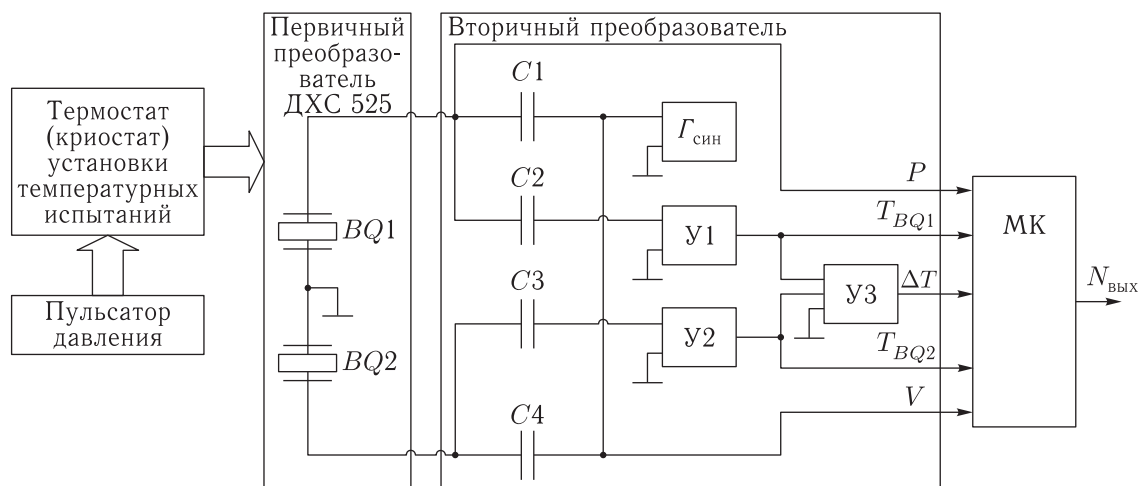


Рис. 3. Схема измерений

а) улучшаются габаритно-массовые характеристики датчика из-за использования одного первичного измерительного преобразователя, применяемого для измерения динамических давления и температуры;

б) увеличивается точность измерения из-за отсутствия пространственного разделения точек измерения динамического давления и температуры в объекте, параметры которого контролируются;

в) упрощаются электрические схемы измерительных цепей вторичных преобразователей, которые используются для формирования корректирующего сигнала, из-за отсутствия отличий в физических и электрических параметрах чувствительных элементов для измерения динамических давлений и температуры;

г) улучшаются метрологические характеристики и увеличивается быстродействие за счет снижения постоянной времени датчика;

д) появляется возможность модернизации существующего технического парка систем, в состав которых входят пьезоэлектрические датчики динамических давлений.

Применение при проектировании датчиков метода импедансного анализа пьезоэлементов совместно с другими схемными и конструктивными методами, которые направлены на повышение точности измерений динамических давлений и коррекции температурных погрешностей, позволит вновь создаваемым датчикам соответствовать все более возрастающим требованиям к надежности систем управления.

Основным реализуемым во вторичном преобразователе схемотехническим способом обработки сигнала для коррекции погрешностей от влияния дестабилизирующих факторов является способ получения информации о значении воздействующего дестабилизирующего фактора непосредственно на первичный преобразователь датчика и вычисление с использованием микроконтроллера значения сигнала коррекции выходного сигнала датчика. При работе пьезодатчиков в условиях термоудара для устранения влияния градиента температур важно измерение пьезоэлементом основного параметра — давления — и воздействующей на пьезоэлемент температуры в одной точке пространства и в одно время, что затрудняет применение дополнительных датчиков измерения температуры, воздействующей на пьезоэлемент рабочей среды, с временным и пространственным разделением каналов измерения давления и температуры.

Авторами рассматривается модель пьезоэлемента, представленная в виде эквивалентной схемы замещения, которая состоит из источника тока, имеющего внутреннее сопротивление, и комплексного сопротивления пьезоэлемента. Комплексное сопротивление пьезоэлемента состоит из активного сопротивления утечек пьезоэлемента и реактивного сопротивления емкости пьезоэлемента. Для измерения температуры пьезоэлемента предлагается использовать зависимость падения амплитудного значения синусоидального напряжения высокой частоты токового сигнала генератора тока



на комплексном сопротивлении пьезоэлемента датчика. Был проведен эксперимент по исследованию температурных характеристик рабочей и компенсирующей секций модуля пьезокерамического ПМ 7-02В из материала ЦТС-83Г (пьезоэлемента) элемента чувствительного (ЭЧ) датчика давления ДХС 525 (датчика) с использованием схемы измерений, приведенной на рис. 2, где  $BQ1$  и  $BQ2$  — рабочая и компенсирующая секции пьезоэлемента соответственно,  $C1-C4$  — конденсаторы для разделения каналов измерения динамического давления и температуры.

Пульсатор давления используется для задания пульсаций давления при определении коэффициента влияния температуры  $K_T$  на коэффициент преобразования датчика  $K_{пр}$ . С генератора синусоидальных колебаний  $G_{син}$  на рабочую  $BQ1$  и компенсирующую  $BQ2$  секции пьезоэлемента ЭЧ датчика подается токовый синусоидальный сигнал с частотой 1 МГц с амплитудным значением напряжения 12 В. Под воздействием изменений температур секций  $BQ1$  и  $BQ2$  пьезоэлемента ЭЧ датчика, которые задаются термостатом (криостатом), амплитуды падений напряжений на импедансах секций  $BQ1$  и  $BQ2$  пьезоэлемента изменяют свои значения. Сигнал об измеряемом динамическом давлении  $\Delta P$ , в котором не скомпенсированы воздействия от изменений температуры  $T$  рабочей среды и от вибрации  $V$  ЭЧ датчика, снимается с электродов рабочей секции  $BQ1$  и поступает на первый вход микроконтроллера МК. Сигнал о вибрации  $V$ , снимаемый с электродов виброкомпенсирующей секции  $BQ2$ , в котором не скомпенсированы воздействия от изменений температуры  $T$ , поступает на пятый вход микроконтроллера МК. Сигналы  $T_{BQ1}$  и  $T_{BQ2}$  о температурах секций  $BQ1$  и  $BQ2$  пьезоэлемента усиливаются с использованием первого У1 и второго У2 высокочастотных усилителей падений напряжений на комплексных сопротивлениях пьезоэлементов  $BQ1$  и  $BQ2$  и поступают на второй и четвертый входы микроконтроллера МК соответственно. Также сигналы  $T_{BQ1}$  и  $T_{BQ2}$  применяются для получения с использованием высокочастотного усилителя разности падений напряжений УЗ-сигнала  $\Delta T$  об отличии температур рабочей  $BQ1$  и виброкомпенсирующей  $BQ2$  секций пьезоэлемента при воздействии термоудара.

Сигнал  $\Delta T$  поступает на третий вход микроконтроллера МК. Микроконтроллером МК с использованием сигналов о динамическом давлении  $\Delta P$ , температуре  $T$ , вибрации  $V$ , разности температур секций пьезоэлемента  $\Delta T$  выполняются коррекции сигналов о динамическом давлении  $\Delta P$  и вибрации  $V$  от воздействия изменений температуры  $T$  рабочей среды. Выходным сигналом микроконтроллера МК является цифровой код  $N_{вых}$  с данными о динамическом давлении  $\Delta P$  и температуре  $T$  рабочей среды, а также вибрации  $V$ , которой подвергается ЭЧ датчика. На рис. 3 приведена полученная зависимость коэффициента  $K_T$  влияния температуры рабочей среды в диапазоне температур от  $-180$  до  $+200$  °С на коэффициент преобразования  $K_{пр}$  ЭЧ датчика ДХС 525. Из рис. 4 видно, что отклонения коэффициента преобразования ЭЧ датчика от воздействия изменений температуры рабочей среды составляют примерно 35 % во всем диапазоне рабочих температур.

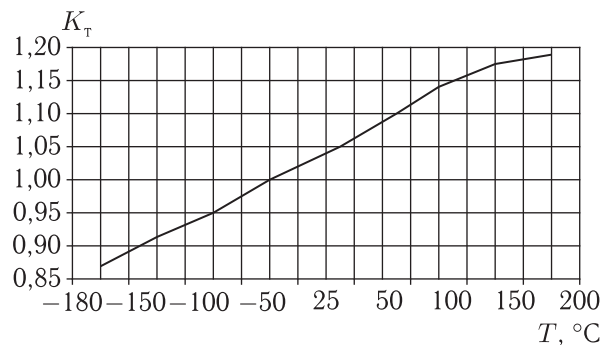


Рис. 4. Зависимость коэффициента влияния температуры  $K_T$  от температуры  $T$

Также была определена временная зависимость выходных сигналов секций пьезоэлемента ЭЧ от изменений температуры рабочей среды с  $+23$  до  $-196$  °С, которая приведена на рис. 5.

Также была определена временная зависимость разности выходных сигналов секций пьезоэлемента, которая приведена на рис. 6.

Как видно из рис. 4 и 5, скорости изменений выходных сигналов секций пьезоэлемента от изменений температуры рабочей среды отличаются в течение некоторого времени. Это происходит из-за неравномерного прогревания элементов ЭЧ датчика при изменении температуры и приводит к наличию в выходном сигнале ЭЧ датчика ошибки

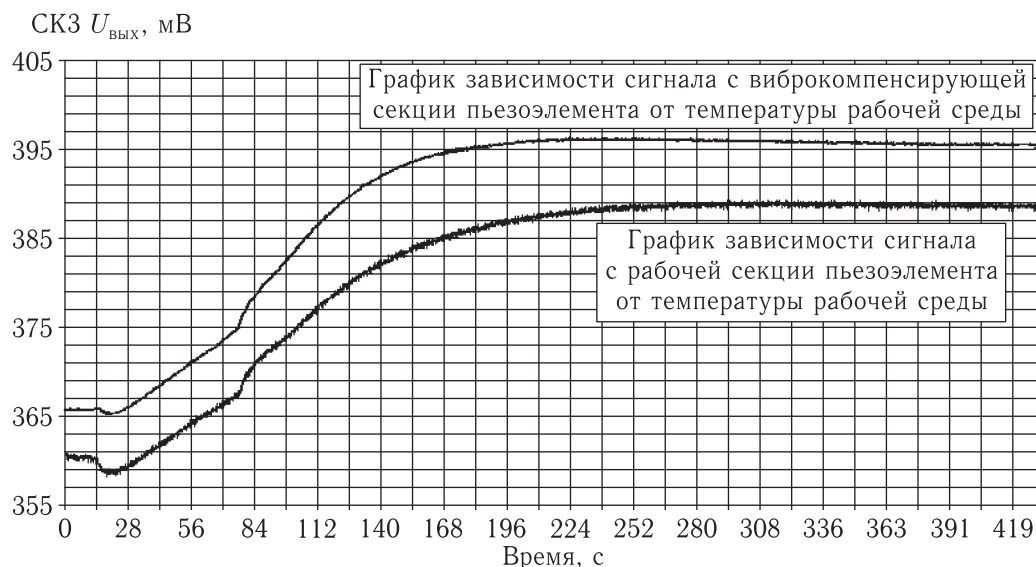


Рис. 5. Зависимость выходных сигналов рабочей  $BQ1$  и виброкомпенсирующей  $BQ2$  секций пьезоэлемента от температуры

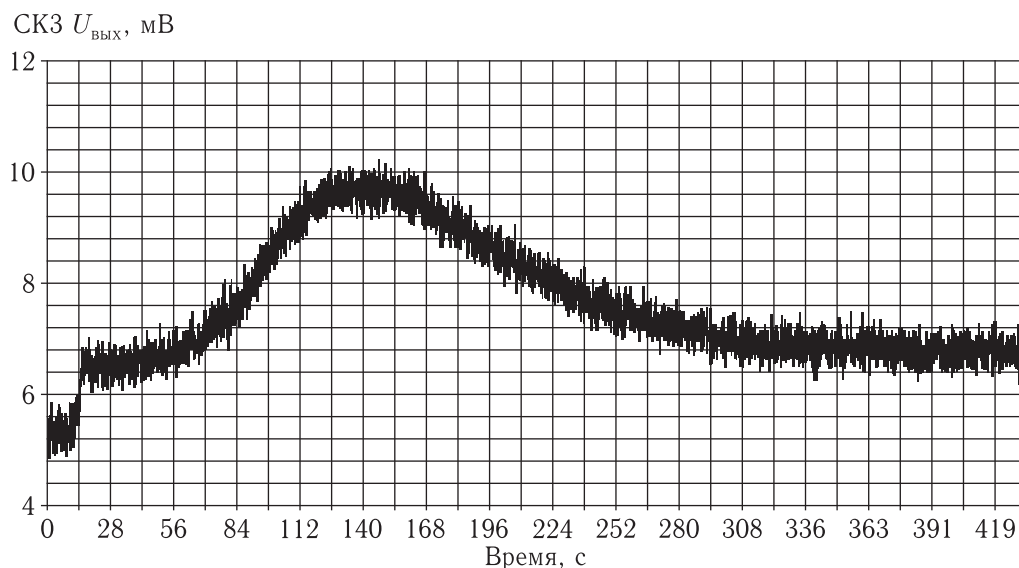


Рис. 6. Зависимость разности выходных сигналов секций пьезоэлемента от температуры

измерения динамического давления от воздействия термоудара. Эта ошибка компенсируется с использованием схемы измерений, приведенной на рис. 3.

Практическая реализация коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков на основе метода импедансного анализа пьезоэлемента позволит повысить точность измерения как серийно выпускаемых, так и вновь проектируемых пьезоэлектрических датчиков динамического давления, а также позволит расширить рабочий диапазон температур.

## Список литературы

1. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е. П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 482 с.
2. Преобразователи. Системы. Каталог ОАО «НИИФИ». Пенза: Пензенская правда, 2011. С. 70–98.
3. Маланин В.П., Шамраков А.Л., Кикот В.В. Устройство коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2014, № 3(9), с. 71–76.