

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 681.586.773: 53.088

В. П. Маланин, В. В. Кикот

О ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ИМПЕДАНСНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

V. P. Malanin, V. V. Kikot

ABOUT APPLICABILITY OF METHOD OF IMPEDANSNOGO OF ANALYSIS FOR CORRECTION OF TEMPERATURE ERROR OF PIEZOELECTRIC SENSORS

А н н о т а ц и я. Рассмотрены актуальность проблемы и существующие методы повышения точности измерений динамических давлений. Проанализированы электрофизические параметры различных пьезоматериалов. Описан эксперимент, проведенный с целью подтверждения применимости метода импедансного анализа пьезоэлементов для коррекции температурных погрешностей пьезоэлектрических датчиков давления. Особое внимание уделено применению этого метода при коррекции воздействий термоудара на точность измерений динамических давлений. Отмечено, что преимуществами реализации схемно-конструктивной коррекции на основе метода импедансного анализа являются повышение точности серийно выпускаемых и вновь проектируемых датчиков, а также расширение температурного диапазона работы этих датчиков.

A b s t r a c t. Actual problems and improve the accuracy of existing methods of measuring dynamic pressures are considered. Various electrical and physical parameters of piezomaterials are analyzes. Experiment conducted to confirm the applicability of the impedance analysis of piezoelectric elements to correct for temperature errors piezoelectric pressure sensors are described. Particular attention is paid to the use of this method for the correction of the effects of thermal shock to the accuracy of dynamic pressure. It is noted that implementation of the scheme and the benefits of structural adjustment on the basis of the impedance analysis is to improve the accuracy of commercially-produced and re-designed transducers, as well as increased operating temperature range of these sensors.

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

К е y w o r d s: pressure sensors, piezoelectric element, temperature errors, method of analysis of impedance.

Наличие в пьезоэлектрической керамике, так же как и в кристаллах, термоупругих и электротермических эффектов приводит к необходимости учета влияния температуры на характеристики пьезоэлектрических датчиков. Воздействие температуры как влияющего фактора может быть устранено с помощью методов пассивной или активной защиты [1]. Принципиально неустранимое конструктивными методами влияние на датчик температурных воздействий может быть скомпенсировано с использованием одного из перспективных методов коррекции температурной погрешности измерения динамического давления – метода им-

педанского анализа пьезоэлементов. В основе этого метода лежат синтез и анализ модели пьезоэлемента в виде эквивалентной схемы замещения, выявление электрических параметров схемы замещения пьезоэлемента, наиболее зависимых от температуры, и последующее формирование сигнала коррекции температурных погрешностей пьезоэлемента путем использования этих параметров. Была исследована зависимость электрического сопротивления модуля пьезокерамического ПМ 7-02В (пьезоэлемента) из цирконата титаната свинца ЦТС-83Г от температуры. Выявлено, что изменение электрического сопротивления пьезоэлемента в диапазоне температур от минус 196 до плюс 25 °С для формирования сигнала коррекции неприменимо, так как схемное решение с использованием отклонения величиной 10^3 – 10^4 Ом электрического сопротивления от начального значения $1 \cdot 10^{12}$ Ом, измеренного при плюс 25 °С, сложно реализовать на практике. Изменение диэлектрической проницаемости ϵ и удельного объемного сопротивления ρ кварца показано на рис. 1, а, б, пьезокерамики PZT-5А на основе цирконата титаната свинца – на рис. 1, в, г. Обращает на себя внимание значительная по сравнению с кварцем зависимость пьезоэлектрической постоянной ϵ от температуры, приводящая к изменению емкости пьезоэлемента от температуры. Датчики акустических давлений измеряют малые уровни динамических давлений и поэтому должны иметь высокую чувствительность. По этой причине при изготовлении чувствительных элементов датчиков акустического давления обычно используется высокочувствительная, но температуронестабильная пьезокерамика из титаната цирконата свинца [1]. Температурные зависимости электрофизических параметров пьезоматериалов приведены на рис. 1.

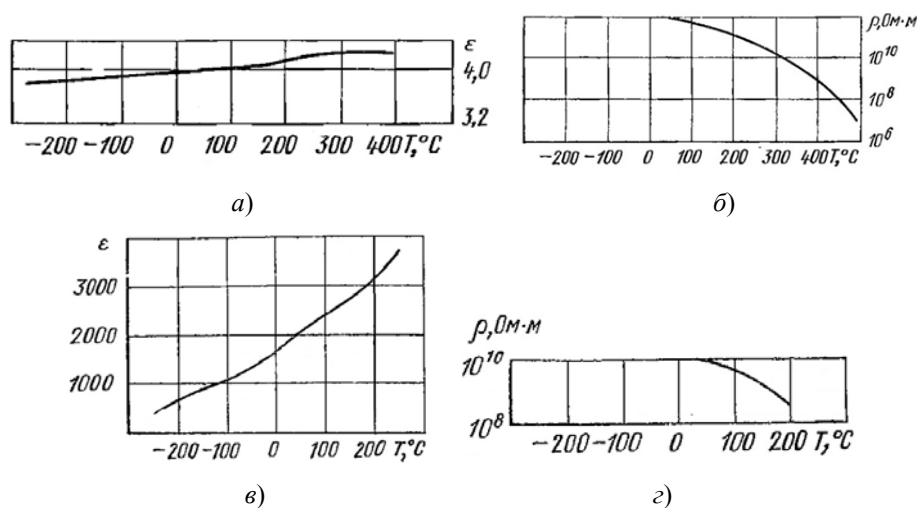


Рис. 1. Температурные характеристики пьезоматериалов: а – зависимость диэлектрической проницаемости ϵ кварца от температуры; б – зависимость удельного объемного сопротивления ρ кварца от температуры; в – зависимость диэлектрической проницаемости ϵ пьезоматериала PZT-5А от температуры; г – зависимость удельного объемного сопротивления ρ пьезоматериала PZT-5А от температуры

При увеличении температуры емкость C_0 пьезоэлемента увеличивается, удельное объемное сопротивление ρ уменьшается, следовательно, значение емкостного сопротивления $Z_C = 1 / j\omega C$ также уменьшается, т.е. отсутствует компенсация изменений от температуры значений ρ и C_0 пьезоэлемента. Так, величина изменений электрической емкости модуля пьезокерамического ПМ 7-02, изготовленного из пьезоматериала ЦТС-83Г, от температуры в диапазоне от минус 196 до плюс 25 °С, которая приведена на рис. 4, а, составляет примерно 70 % [2]. Для измерения температуры может быть использована зависимость падения амплитудного значения напряжения высокочастотного токового сигнала на комплексном сопротивлении Z_c пьезоэлемента датчика, однозначно зависящем от температуры. Измерения в режиме реального времени текущих значений C_0 при эксплуатации датчиков могут однозначно указывать на температуру датчиков и величину поправки на изменение чувствительности датчиков от температуры. Практической реализацией работ в этом направлении стало разработанное авторами устройство коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков давления [3].

Для исследования характеристик модуля пьезокерамического ПМ 7-02В был проведен эксперимент. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Элемент чувствительный (ЭЧ) датчика давления ДХС 525 (датчика) устанавливается в посадочное гнездо термостата (криостата) установки температурных испытаний, установленной на пульсаторе. Пульсатор используется для задания пульсаций давлений при определении коэффициента влияния температуры K_T на коэффициент преобразования датчика $K_{пр}$. Выход генератора синусоидальных колебаний $\Gamma_{син}$ через конденсаторы $C1$, $C4$ подключен к рабочей $BQ1$ и компенсирующей $BQ2$ секциям модуля пьезокерамического ПМ 7-02В (пьезоэлемента) ЭЧ датчика. Вход электронного вольтметра ЭВ1 через конденсатор $C2$ подключен к рабочей секции $BQ1$ пьезоэлемента, а вход электронного вольтметра ЭВ2 через конденсатор $C3$ подключен к компенсирующей секции $BQ2$ пьезоэлемента. Конденсаторы $C1$ – $C4$ с малыми значениями емкостей используются для отсечки электромагнитных помех, наводимых промышленной электросетью. С генератора синусоидальных колебаний $\Gamma_{син}$ на рабочую $BQ1$ и компенсирующую $BQ2$ секции пьезоэлемента ЭЧ датчика подается токовый синусоидальный сигнал с частотой 1 МГц. 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. Изменения амплитуд от температуры фиксируются электронными вольтметрами ЭВ1 и ЭВ2.

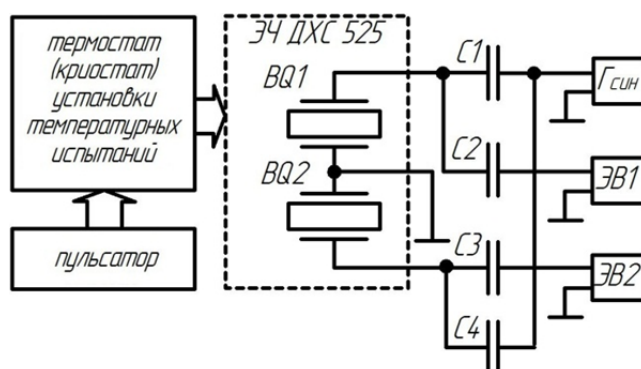


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Эксперимент по исследованию характеристик пьезоэлемента проводился в три этапа:

- на первом этапе была определена зависимость коэффициента влияния температуры рабочей среды в диапазоне от минус 180 до плюс 200 °С на коэффициент преобразования $K_{пр}$ ЭЧ датчика (рис. 3);
- на втором этапе была получена градуировочная температурная характеристика ЭЧ датчика (рис. 4,б);
- на третьем этапе была получена временная зависимость среднеквадратических значений (СКЗ) выходных напряжений секций пьезоэлемента при термоударе от воздействия жидкого азота с температурой минус 196 °С на ЭЧ датчика с температурой плюс 23 °С (рис. 5,а), а также рассчитана временная зависимость разности СКЗ выходных напряжений секций $BQ1$ и $BQ2$ пьезоэлемента при воздействии этого термоудара (рис. 5,б).

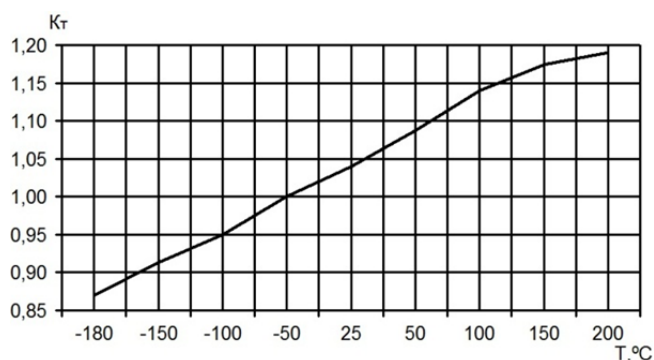


Рис. 3. Зависимость коэффициента K_T ЭЧ датчика от температуры

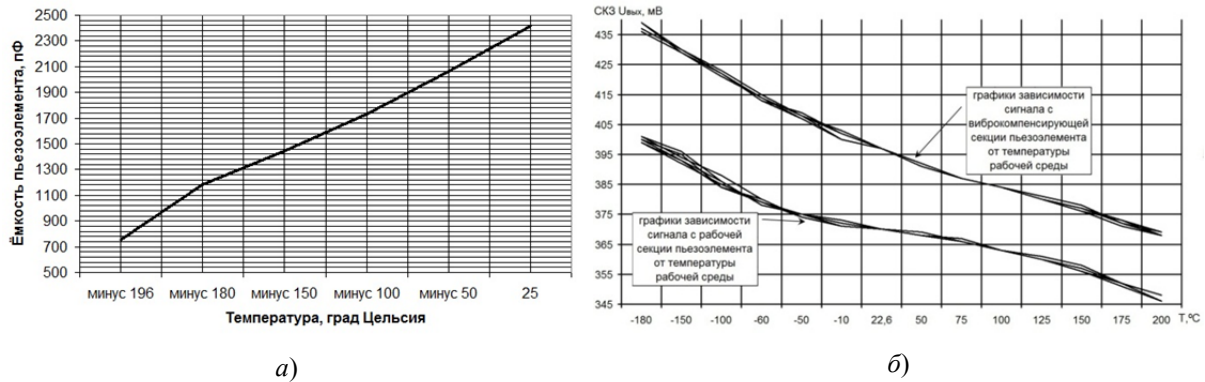


Рис. 4. Температурные характеристики пьезоэлементов:

а – зависимость электрической емкости модуля пьезокерамического ПМ 7-02 от температуры;
б – зависимость выходного сигнала рабочей *BQ1* и виброкомпенсирующей *BQ2* секций пьезоэлемента ПМ 7-02В ЭЧ датчика от температуры

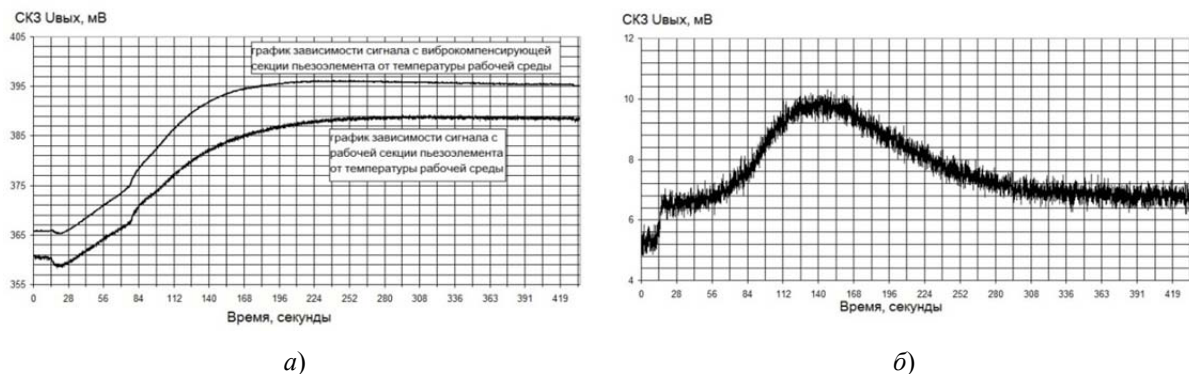


Рис. 5. Температурные характеристики пьезоэлемента ЭЧ датчика при воздействии термоудара:
а – временная зависимость выходных сигналов рабочей *BQ1* и виброкомпенсирующей *BQ2* секций пьезоэлемента ЭЧ датчика от температуры при воздействии термоудара; *б* – временная зависимость разности выходных сигналов рабочей *BQ1* и виброкомпенсирующей *BQ2* секций пьезоэлемента ЭЧ датчика от температуры при воздействии термоудара

На рис. 3 видно, что изменение коэффициента преобразования ЭЧ датчика от температуры составляет примерно 35 %. Эта величина может компенсироваться схемными методами с использованием электрической цепи вторичного преобразователя, а также конструктивными методами, например, как в рассматриваемом ЭЧ датчика, с использованием механически встречного расположения компенсирующей секции пьезоэлемента относительно рабочей секции. Это сделано для взаимной компенсации отклонений параметров секций пьезоэлемента от температуры и вибрации.

При измерении давления рабочей среды при значительном изменении температуры рабочей среды (отличного от текущего значения температуры примерно на половину температурного диапазона) за малое время (менее 1 с), т.е. при термоударе, следует учитывать, что чувствительный и компенсирующий элементы нагреваются не одновременно. Первоначально прогревается (или охлаждается) корпус ЭЧ датчика, затем неравномерно нагревается мембрана и воздействует на рабочую секцию *BQ1* пьезоэлемента с силой, пропорциональной деформации от термоудара. Затем прогреваются корпус, рабочая *BQ1* и компенсирующая *BQ2* секции пьезоэлемента [4]. В первую очередь прогревается рабочая секция *BQ1* пьезоэлемента, а затем, с некоторым отставанием, – компенсирующая секция *BQ2*. Через некоторое время температуры всех элементов конструкции ЭЧ датчика выравниваются. Пример этого явления приведен на рис. 5, *а, б*.

Во время воздействия термоудара примененный в ЭЧ датчика конструктивный метод уменьшения погрешности от воздействия температуры является неэффективным. И обычно в этом случае используется или предварительная настройка датчика с использованием пассивной схемной коррекции, если известна функциональная зависимость воздействия температуры от времени, или применяется активная схемная коррекция с использованием дополнительного

канала измерения температуры с последующей обработкой сигналов микроконтроллером. Как следует из рис. 5,б, с использованием выходных сигналов с рабочей $BQ1$ и компенсирующей $BQ2$ секций пьезоэлемента можно сформировать сигнал коррекции температурного воздействия не только при медленном изменении температуры, но и при термоударе.

Преимуществами применения метода импедансного анализа для повышения точности измерения динамического давления датчиками, чувствительные элементы которых содержат два и более пьезоэлементов, являются:

- использование дополнительного канала измерения температуры без введения в систему, параметры рабочей среды которой контролируются, дополнительного датчика температуры;
- отсутствие отличий в электрофизических характеристиках элементов, которые используются для измерения динамических давлений и температуры, так как для получения сигналов по динамическим давлениям и температурам используется один пьезоэлемент.

Практическая реализация схемно-конструктивной коррекции на основе метода импедансного анализа позволит повысить точность измерения как серийно выпускаемых, так и вновь проектируемых пьезоэлектрических датчиков динамического давления с одновременным расширением рабочего диапазона температур.

Список литературы

1. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – С. 185–186.
2. Маланин, В. П. Устройство коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков давления / В. П. Маланин, А. Л. Шамраков, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 3 (9). – С. 71–76.
3. Заявка на изобретение РФ № 2014132334. Устройство измерения динамического давления / Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Маланин В. П., Кикот В. В. – Приоритет: 05.08.2014.
4. Martini, K. R. New range of high-temperature quartz pressure transducers / K. R. Martini // Transducer'77 : conference. – Лондон, 1977. – 30 с.

Маланин Владимир Павлович

кандидат технических наук,
инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: ait@pnzgu.ru

Malanin Vladimir Pavlovich

candidate of technical sciences,
electronic engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurement

Кикот Виктор Викторович

аспирант,
Пензенский государственный университет;
инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: inbox@post.su

Kikot Viktor Viktorovich

postgraduate student,
Penza State University;
design-engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurement

УДК 681.586.773: 53.088

Маланин, В. П.

О применимости метода импедансного анализа для коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков / В. П. Маланин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 52–56.