

КОРРЕКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОУДАРА

Аннотация.

Актуальность и цели. Расширение рабочего температурного диапазона пьезоэлектрических датчиков и улучшение их метрологических характеристик, особенно при работе в жестких условиях эксплуатации и воздействии нестационарных температур, является одной из актуальных задач при разработке датчиков-преобразующей аппаратуры. Измерение динамических давлений таких жидких сред, как кислород и водород, характеризуется мощным и быстро изменяющимся температурным воздействием в диапазоне от минус 253 до плюс 200 °С, что вызывает температурные переходные процессы в конструкции пьезоэлектрических датчиков и, как следствие, возрастание во время переходных процессов погрешностей измерений входных неэлектрических величин.

Материалы и методы. Исследованы возможности уменьшения температурной погрешности измерения динамического давления пьезоэлектрическими датчиками.

Результаты. Приведена предлагаемая функциональная схема пьезоэлектрического датчика динамического давления со схемой коррекции температурной погрешности пьезоэлемента и описан принцип ее работы. Показаны экспериментально определенные временные зависимости выходных сигналов пьезоэлектрического датчика при термоударном воздействии рабочей среды.

Выводы. Полученные результаты показывают возможность коррекции температурных погрешностей пьезоэлектрических датчиков динамического давления как от воздействия статических температур, так и от воздействия термоудара, путем использования электрической емкости схемы замещения пьезоэлемента в качестве информативного параметра по температуре.

Ключевые слова: пьезоэлемент, термоудар, эквивалентная схема замещения, коэффициент преобразования, коррекция температурной погрешности.

V. V. Kikot, V. P. Malanin, M. A. Shcherbakov

CORRECTION OF A TEMPERATURE ERROR OF A PIEZOELECTRIC DYNAMIC PRESSURE SENSOR UNDER THERMAL SHOCK

Abstract.

Background. The expansion of the working temperature range of piezoelectric sensors and the improvement of their metrological characteristics, especially when operating in harsh environments under the impact of non-stationary temperature, are among the urgent tasks of the development of sensor-transforming equipment. Measurement of the dynamic pressure of such liquids as oxygen and hydrogen, characterized by a powerful and rapidly changing temperature effect in the range from minus 253 to 200 °C, which causes temperature transients in the construction of piezoelectric sensors and, consequently, an increase nonelectric values input errors in transient processes.

Materials and methods. The authors researched a possibility of reducing the temperature error of the dynamic pressure measurement by piezoelectric sensors

Results. The article adduces a functional block diagram of a piezoelectric dynamic pressure sensor with a temperature error correction circuit of a piezoelectric element, and the functioning principle thereof. The work also shows experimentally determined time dependencies of output signals of a piezoelectric sensor under thermal shock exposure to the working environment.

Conclusions. The results show the possibility of correcting errors of the temperature of the piezoelectric dynamic pressure sensors, caused by exposure to static temperatures and thermal shocks, by using the electric capacitance of a piezoelement's equivalent circuit as a temperature-indicating parameter.

Key words: piezoelement, thermal shock, equivalent circuit, conversion coefficient, temperature error correction.

Введение

Расширение рабочего температурного диапазона пьезоэлектрических датчиков и улучшение их метрологических характеристик, особенно при работе в жестких условиях эксплуатации и воздействия нестационарных температур, является одной из актуальных задач при разработке датчиков-преобразующей аппаратуры [1–3]. Измерение динамических давлений таких жидких сред, как кислород и водород, характеризуется мощным и быстроизменяющимся температурным воздействием в диапазоне от минус 253 до плюс 200 °С, что вызывает температурные переходные процессы в конструкции пьезоэлектрических датчиков и, как следствие, возрастание во время переходных процессов погрешностей измерений входных неэлектрических величин.

Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков динамического давления возможна в виде вводимой в сигнал измерения поправки по значениям сигнала дополнительного датчика температуры пьезоэлемента или воздействующей на него рабочей среды. Общеизвестны устройства, в которых при измерении давления такие влияющие дестабилизирующие факторы, как температура рабочей и окружающей среды, температура корпуса датчика, вибрации, измеряются введенными в измерительную систему дополнительными датчиками, сигналы с которых используются для коррекции выходных сигналов датчика давления [3–5]. Для этого дополнительно рядом с датчиком давления устанавливается, например, датчик температуры или датчик вибраций и на основании его сигналов в канал измерения давления вводится сигнал коррекции температурной или вибрационной погрешности измерения давления.

При воздействии нестационарных температур пространственное разделение чувствительных элементов по давлению и температуре приводит к возникновению между ними градиента температур и снижению эффективности коррекции температурной погрешности измерения давления, что особенно проявляется в условиях термоудара. Устранение градиента температур между чувствительными элементами по динамическому давлению и температуре возможно при условии измерения динамического давления и влияющей на результат его измерения температуры в одной точке пространства и в одно время, что возможно при использовании только одного пьезоэлемента как в качестве чувствительного элемента по давлению (вибрации), так и чувствительного элемента по температуре.

Основная часть

Электрофизические параметры материалов пьезоэлементов (диэлектрическая проницаемость, удельное объемное сопротивление и др.) зависят от температуры, пьезоэлемента, что в общем случае приводит к изменению значений параметров модели пьезоэлемента в виде его эквивалентной схемы замещения [6, 7]. Эквивалентная схема замещения пьезоэлемента наряду с управляемым входной измеряемой величиной источником тока (заряда) с внутренним сопротивлением $R_i \rightarrow \infty$ содержит включенные параллельно с источником тока сопротивление утечек пьезоэлемента и емкость пьезоэлемента, обусловленную диэлектрической проницаемостью материала пьезоэлемента. Эти пассивные электрические параметры схемы замещения, однозначно зависящие от температуры, можно использовать в качестве информативных параметров по температуре, преобразовав их отдельной измерительной цепью в сигнал коррекции по температуре [4]. Компенсация температурной погрешности пьезоэлемента при измерении давления возможна на последующих этапах преобразования сигналов с пьезоэлемента путем их обработки микроконтроллером и введения в коды соответствующих поправок по значениям сигналов преобразования информативного параметра схемы замещения пьезоэлемента по температуре.

При воздействии термоудара к температурной погрешности пьезоэлектрического датчика давления от стационарной температуры добавляется составляющая погрешности от термоудара [2]. Возникновение этой составляющей связано с пирозэффектом пьезокерамики, а также с разделением во времени воздействия скачка температуры на мембрану, пьезоэлемент, корпус датчика, элементы крепления пьезоэлемента вследствие их различного пространственного положения относительно вектора воздействия градиента температуры, что приводит к изменению параметров, влияющих на функцию преобразования пьезоэлектрического датчика. Для компенсации температурной погрешности пьезоэлемента от воздействия термоудара необходимо измерить градиент температуры как разность температур между температурой пьезоэлемента и температурой какого-либо элемента конструкции датчика, расположенного относительно пьезоэлемента в направлении вектора градиента на некотором расстоянии. В качестве такого элемента можно выбрать применяемый в пьезоэлектрических датчиках динамического давления дополнительный пьезоэлемент для компенсации погрешности от вибраций корпуса датчика давления.

На рис. 1 представлена функциональная схема пьезоэлектрического датчика динамического давления со схемой коррекции температурной погрешности пьезоэлемента, как от воздействия стационарной температуры, так и от воздействия термоудара. Первичный измерительный преобразователь (ПИП) датчика динамического давления выполнен в виде отдельного конструктивного элемента, предназначенного для работы в диапазоне криогенных температур, который соединен кабельной перемычкой КП с блоком вторичного измерительного преобразователя (ВИП). Конструктивно ПИП датчика выполнен квазидифференциальным и состоит из двух идентичных пьезоэлементов: рабочего пьезоэлемента ПЭ1 и виброкомпенсирующего пьезоэлемента ПЭ2, расположенных внутри цилиндрического корпуса и разделенных друг от друга прокладкой. Пьезоэлемент ПЭ1 предназначен для измере-

ния динамического давления P , расположен в торце цилиндрического корпуса и защищен от воздействия рабочей среды мембраной. Пьезоэлемент ПЭ2 расположен далее по оси цилиндрического корпуса, защищен прокладкой от воздействия на него измеряемого динамического давления, предназначен для измерения вибраций V . Это позволяет при измерении динамического давления благодаря соответствующему включению пьезоэлементов в измерительную цепь компенсировать погрешности возникающие от вибраций корпуса датчика.

Пьезоэлементы ПЭ1 и ПЭ2 на рис. 1 показаны в виде эквивалентных схем замещения, состоящих из источников зарядов $q1$ и $q2$ с внутренними сопротивлениями $R_i \rightarrow \infty$, к которым параллельно подключены сопротивления утечек пьезоэлементов $R1, R2$ и электрических емкостей $C1$ и $C2$ пьезоэлементов.

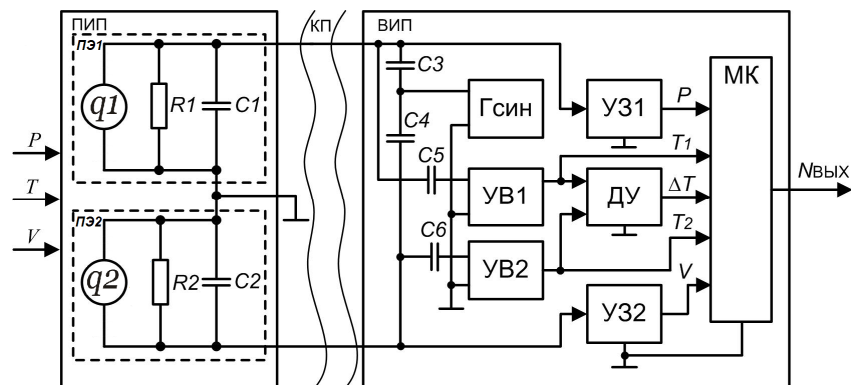


Рис. 1. Функциональная схема пьезоэлектрического датчика динамического давления со схемой коррекции температурной погрешности пьезоэлемента

В качестве информативного по температуре T параметра эквивалентной схемы замещения пьезоэлементов выбрано температурное изменение электрических емкостей $C1$ и $C2$. На основании закона Ома падение напряжения на выводах пьезоэлементов от протекания синусоидального тока генератора тест-сигнала $\Gamma_{\text{син}}$ при $R_i \rightarrow \infty$ определяется выражением

$$\dot{U}_{\text{ПЭ1}(2)} = \dot{I}_{\text{ГТС}} Z_{\text{ПЭ1}(2)} = \dot{I}_{\text{ГТС}} \frac{R1(2) \frac{1}{j\omega C1(2)}}{R1(2) + \frac{1}{j\omega C1(2)}}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f_{\text{ГТС}}$; $I_{\text{ГТС}}$ и $f_{\text{ГТС}}$ – амплитуда и частота синусоидального тока генератора $\Gamma_{\text{син}}$ соответственно; $R1(2)$ и $C1(2)$ – сопротивления утечек $R1, R2$ и электрические емкости $C1$ и $C2$ пьезоэлементов ПЭ1 и ПЭ2 соответственно; $Z_{\text{ПЭ1}(2)}$ – комплексное сопротивление пьезоэлементов ПЭ1 и ПЭ2 соответственно.

Выбором значения частоты $f_{\text{ГТС}}$ тест-сигнала генератора $\Gamma_{\text{син}}$ достигается выполнение соотношения $R1(2) \gg \frac{1}{\omega C1(2)}$, при этом модуль выражения (1) имеет вид

$$U_{ПЭ1(2)} \approx I_{ГТС} \cdot \frac{1}{\omega \cdot C1(2)}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что модуль падения напряжения на выводах пьезоэлементов от протекания тока генератора $\Gamma_{\text{син}}$ обратно пропорционален значениям электрических емкостей $C1$ и $C2$, зависящих от температур пьезоэлементов. Пьезоэлементы ПЭ1 и ПЭ2 соединены через прецизионные конденсаторы $C3$ и $C4$ соответственно с выходом генератора стабильного по частоте и амплитуде синусоидального напряжения $\Gamma_{\text{син}}$ блока ВИП. Для частотного разделения сигналов, снимаемых с выводов каждого пьезоэлемента, по давлению и по температуре значение частоты генератора $\Gamma_{\text{син}}$ должно превышать верхнюю границу частотного диапазона измерения динамического давления. При значениях электрических емкостей $C1$ и $C2$ значительно больших, чем $C3$, $C4$ и $C5$, $C6$, создается условие измерения реактивных сопротивлений электрических емкостей $C1$ и $C2$ в режиме заданного тока с минимальным влиянием на результат измерения динамического давления. Электрические сигналы, пропорциональные давлению и вибрации, снимаются соответственно с выводов пьезоэлементов ПЭ1 и ПЭ2, усиливаются усилителями зарядов УЗ1 и УЗ2 и поступают в виде напряжений P и V на аналоговые входы микроконтроллера МК для последующей обработки и коррекции погрешностей от температуры и вибраций.

На рис. 2 представлена экспериментальная временная зависимость выходного сигнала ПИП пьезодатчика при пульсациях давления 50 кПа с частотой 50 Гц при термоударном воздействии рабочей среды минус 196 °С с градиентом 200 °С в секунду.

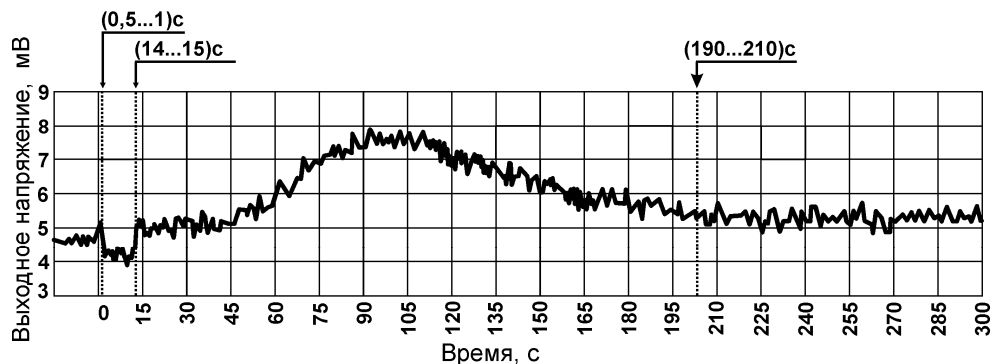


Рис. 2. Выходной сигнал ПИП датчика с пьезоэлементами из модифицированного материала ЦТС 83Г

Из рис. 2 видно, что в первые 0,5–1 с после начала термоудара из-за мгновенной деформации мембраны наблюдается скачок выходного напряжения с 4,7 до 5,2 мВ. Затем в связи с пирозэффектом в ПЭ1 из-за высокоградиентного изменения его температуры и пьезоэффекта в ПЭ1 от его деформации из-за различий коэффициентов теплового линейного расширения элементов ПИП датчика уровень сигнала понижается до 4,2 мВ. Далее на протяжении времени с 15 по (190–210) с видно, что из-за различий температур ПЭ1 и ПЭ2 выходной сигнал датчика возрастает, а потом, по мере выравнивания

температур ПЭ1 и ПЭ2, снижается. Начиная с (190–210) с переходные процессы в ПИП, связанные с термоударом, завершаются, выходной сигнал ПИП становится стабильным.

На рис. 3,а представлена экспериментально снятая зависимость электрической емкости пьезоэлемента из модифицированного материала ЦТС-83Г при воздействии температуры в диапазоне от минус 196 до плюс 25 °С. Из рис. 3,а видно, что значение емкости пьезоэлемента при изменении температуры в указанном диапазоне меняется на 70 % относительно значения при 25 °С, что вполне достаточно для получения информативного сигнала для коррекции погрешности по температуре.

На рис. 3,б представлены экспериментально снятые для схемы на рис. 1 зависимости среднеквадратичных значений падений напряжений на выводах рабочего и компенсирующего пьезоэлементов из модифицированного материала ЦТС-83Г датчика динамических давлений при воздействии температуры в диапазоне от минус 180 до плюс 200 °С при частоте 1 МГц синусоидального напряжения генератора $\Gamma_{\text{син}}$ и значениях электрических емкостей конденсаторов $C3$, $C4$, равных по 50 пФ каждый.

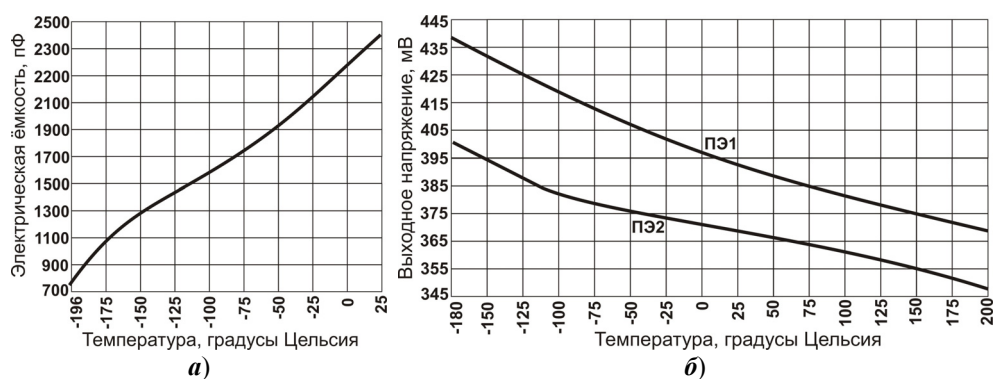


Рис. 3. Зависимость электрической емкости пьезоэлемента от температуры (а); зависимость выходных напряжений пьезоэлементов ПЭ1 и ПЭ2 от температуры (б)

На рис. 4 представлены экспериментально снятые временные зависимости падений напряжений при протекании тока генератора $\Gamma_{\text{син}}$ с частотой 1 МГц на электродах рабочего и компенсирующего пьезоэлементов при термоударном воздействии рабочей среды минус 196 °С с градиентом 200 °С в секунду. На рис. 5 приведена временная зависимость разности падений напряжений на пьезоэлементах, которая поступает на вход дифференциального операционного усилителя ДУ схемы, показанной на рис. 1.

Заключение

Полученные результаты показывают возможность коррекции температурных погрешностей пьезоэлектрических датчиков динамического давления как от воздействия статических температур, так и от воздействия термоудара путем использования электрической емкости схемы замещения пьезоэлемента в качестве информативного параметра по температуре. Соответствующий выбор частоты тест-сигнала для измерения электрической емкости схемы за-

мещения пьезоэлемента позволяет, используя частотные фильтры, разделить сигналы для измерения динамического давления и температуры. Использование полученных информативных сигналов при обработке микроконтроллером позволяет:

- скомпенсировать температурные погрешности от воздействия статической температуры рабочей среды, а также все составляющие погрешности от термоудара, не ограничивая частотный диапазон измерения динамического давления за счет соответствующего выбора частоты тест-сигнала генератора $\Gamma_{\text{син}}$ и значений электрических емкостей конденсаторов $C3-C6$;

- определить коэффициенты функции коррекции температурной погрешности пьезоэлемента для рабочей программы микроконтроллера возможно по результатам предварительных испытаний и градуировки датчика.

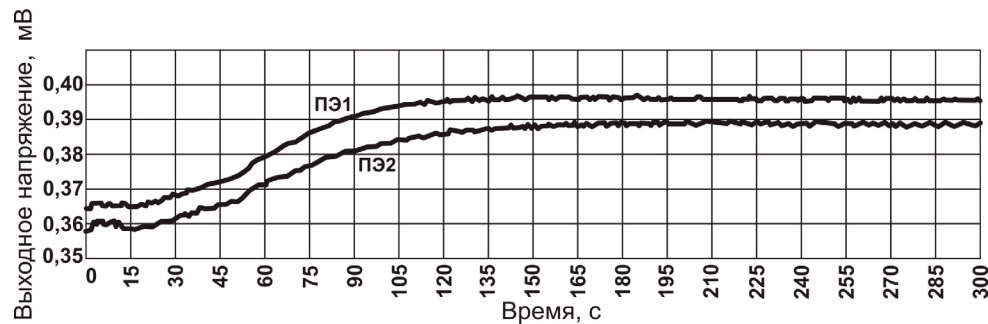


Рис. 4. Выходные сигналы с рабочего ПЭ1 и виброкомпенсирующего ПЭ2 пьезоэлементов

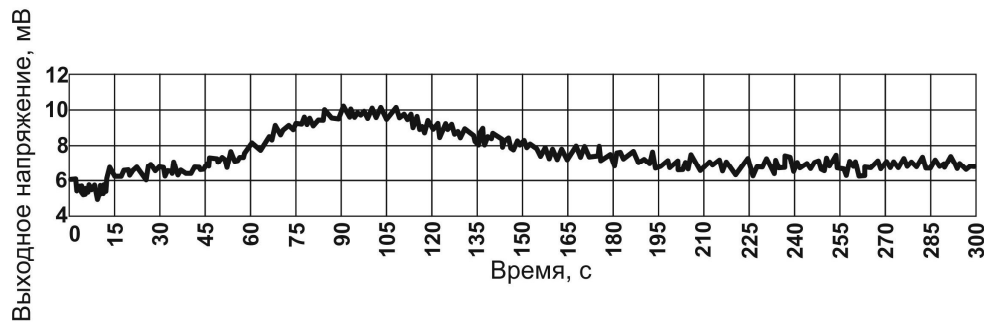


Рис. 5. Разность высокочастотных сигналов с ПЭ1 и ПЭ2

Микроконтроллером на основании полученных при предварительной настройке датчика зависимостей пьезоэлектрического напряжения пьезоэлементов от давления рабочей среды и температуры, а также зависимостей падений напряжений на пьезоэлементах от тест-сигнала и их разности от температуры рабочей среды вычисляются сигналы коррекции ошибки измерения динамического давления от влияния статической температуры и термоудара. В результате цифровой обработки микроконтроллером полученных с ПИП аналоговых сигналов в виде напряжений, поступающих на вход аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера, формируется скорректированный по температуре сигнал о значении динамического давления рабочей среды в виде двоичного кода $N_{\text{вых}}$.

Список литературы

1. **Богущ, М. В.** Влияние температуры на коэффициент преобразования пьезоэлектрических датчиков / М. В. Богущ // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 2. – С. 26–39.
2. **Мартини, К. Р.** Новый уровень высокотемпературных кварцевых датчиков давления / К. Р. Мартини // Трансдюсер'77 : сб. ст. конф. – Лондон, 1977. – 29 с.
3. **Богущ, М. В.** Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / М. В. Богущ ; под ред. А. Е. Панича. – М. : Техносфера, 2014. – 312 с.
4. **Доля, В. К.** Проектирование интеллектуального датчика акустического давления : учеб.-метод. пособие / В. К. Доля. – Ростов н/Д : ЮФУ, 2009. – 21 с.
5. А. с. SU 1765732 A2 СССР, МПК G 01 L 9/08. Датчик давления / Ю. А. Пивкин, С. Д. Забродина (СССР). – 4890282/10 ; заявл. 10.12.1990 ; опубл. 30.09.1992, Бюл. № 36. – 4 с.
6. **Кнеллер, В. Ю.** Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – С. 144.
7. **Осадчий, Е. П.** Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 482 с.

References

1. Bogush M. V. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics]. 2008, no. 2, pp. 26–39.
2. Martini K. R. *Transd'yuser'77: sb. st. konf.* [Transducer'77: conference proceedings]. London, 1977, 29 p.
3. Bogush M. V. *Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektrottermouprugikh modeley* [Designing piezoelectric sensors on the basis of three-dimensional electrothermoelastic models]. Moscow: Tekhnosfera, 2014, 312 p.
4. Dolya V. K. *Proektirovanie intellektual'nogo datchika akusticheskogo davleniya: ucheb.-metod. posobie* [Intelligent acoustic pressure sensor design: tutorial]. Rostov-on-Don: YuFU, 2009, 21 p.
5. A. s. SU 1765732 A2 SSSR, MPK G 01 L 9/08. *Datchik davleniya* [A pressure sensor]. Yu. A. Pivkin, S. D. Zabrodina (SSSR). 4890282/10; appl. 10.12.1990; publ. 30.09.1992, Bull. № 36, 4 p.
6. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determining parameters of multiple-unit dipoles]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, p. 144.
7. Osadchiy E. P. *Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin* [Designing sensors for mechanical values measurement]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979, 482 p.

Кикот Виктор Викторович

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: inbox@post.su

Kikot Viktor Viktorovich

Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Маланин Владимир Павлович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: avitel@pnzgu.ru

Malanin Vladimir Pavlovich

Candidate of engineering science, associate
professor, sub-department of automation
and remote control, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Щербаков Михаил Александрович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматики
и телемеханики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: avitel@pnzgu.ru

Shcherbakov Mikhail Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of automation
and remote control, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.586.773: 53.088.3

Кикот, В. В.

Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрического датчика динамического давления в условиях термоудара / В. В. Кикот, В. П. Маланин, М. А. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 105–113. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-10