

УДК 681.586.773: 53.088

В. П. Маланин, А. Л. Шамраков, В. В. Кикот

УСТРОЙСТВО КОРРЕКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

V. P. Malanin, A. L. Shamrakov, V. V. Kikot

THE CORRECTION DEVICE TEMPERATURE ERROR PIEZOELECTRIC PRESSURE SENSORS

А н н о т а ц и я. Рассмотрено применение устройства коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков давления в условиях воздействия нестационарных температур как возможность расширения температурного диапазона работы и повышения точности систем измерения, блоков и элементов ракетно-космической техники.

A b s t r a c t. The application temperature error correction device piezoelectric pressure sensors under the impact transient temperature as the possibility of extending the temperature range of work and improve the accuracy of measurement systems, units and elements of rocket and space technology are presented.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчики давления, пьезоэлемент, температурная погрешность, мембрана, эквивалентная схема, комплексное сопротивление, коэффициент преобразования, температурная зависимость.

К е y w o r d s: pressure sensors, piezoelectric element, temperature error, the membrane, equivalent circuit, impedance, conversion factor, the temperature dependence.

Основу любых систем, блоков и элементов ракетно-космической техники составляют датчики, воспринимающие не только информацию об измеряемой механической величине, но и воздействие влияющих факторов, сопровождающих их эксплуатацию. Датчиковая аппаратура, применяемая для этих целей, подвергается наиболее сосредоточенному и комплексному воздействию дестабилизирующих факторов, таких как перепад давлений, высокие уровни вибрационных и ударных нагрузок, нестационарные температуры. Важным является исследование влияния нестационарных температур на метрологические характеристики датчиков быстропеременных и акустических давлений (датчиков давлений). Различные методы коррекции влияния температурной погрешности на результаты измерений датчиков давления используются для расширения температурного диапазона работы датчиков и улучшения их метрологических характеристик.

Например, основным способом коррекции является определение величины (значения) сигнала коррекции с помощью дополнительного датчика, измеряющего параметры влияющей величины, — дополнительно устанавливается датчик температуры и на основании его показаний вводится сигнал коррекции температурной погрешности измерения давления. Важным является измерение основного параметра — давления — и влияющего параметра — температуры — в одной точке пространства в одно время.

В [1–4] описаны устройства, в которых влияющие параметры (температура окружающей среды, температура корпуса датчика, влажность и др.) измеряются введенными в измерительную систему дополнительными датчиками этих параметров. В [5] одним чувствительным элементом описанного устройства измеряются два параметра попеременно.

Временное разделение сигналов, которое применяется в устройствах измерения, имеет ряд недостатков. Использование коммутационных элементов снижает быстродействие и точность устройств. Это следствие влияния переходных процессов, которые возникают в коммутирующих элементах во время их переключения. Также на стабильность характеристик коммутирующих элементов влияют изменения температуры окружающей среды.

На рис. 1 представлена разработанная авторами структурная схема датчика давления с подключенной схемой коррекции температурной погрешности.

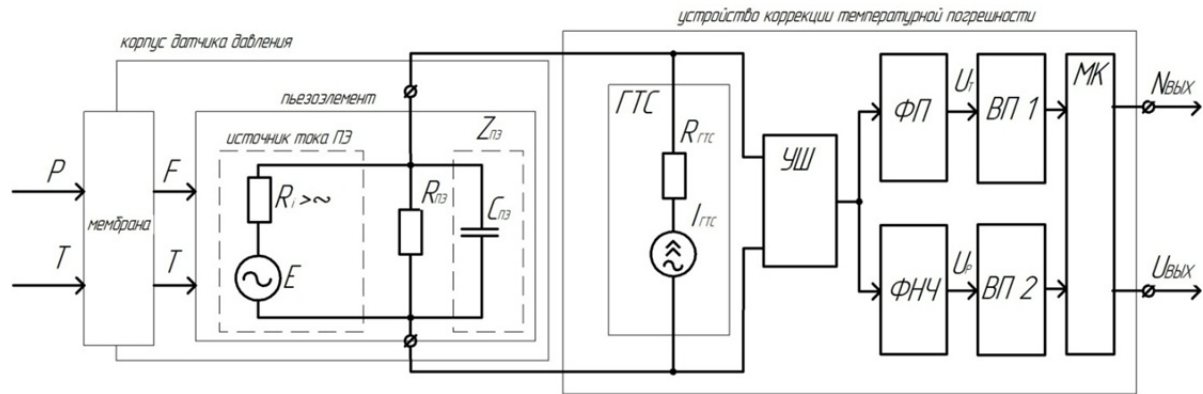


Рис. 1. Канал измерения давления пьезоэлектрического датчика давления ($R_i \gg R_{ПЭ}$, $R_{ГТС} \gg R_{ПЭ}$)

Пьезоэлемент 5 показан в виде предлагаемой авторами эквивалентной схемы замещения, состоящей из источника тока 4, который состоит из источника пьезоэлектрического напряжения E с внутренним сопротивлением R_1 , и комплексного сопротивления пьезоэлемента 6, которое состоит из внутреннего сопротивления пьезоэлемента R_2 и емкости пьезоэлемента C_1 .

Пьезоэлемент датчика давления показан на рис. 1 в виде предлагаемой авторами эквивалентной схемы замещения, состоящей из источника тока $I_{ПЭ}$, который состоит из источника пьезоэлектрического напряжения E с внутренним сопротивлением $R_i \rightarrow \infty$ и комплексного сопротивления пьезоэлемента $Z_{ПЭ}$, которое состоит из сопротивления пьезоэлемента $R_{ПЭ}$ и емкости пьезоэлемента $C_{ПЭ}$.

Пьезоэлемент датчика давления подключен к генератору тест-сигнала ГТС устройства коррекции температурной погрешности. ГТС задает синусоидальный ток со стабильными амплитудой $I_{ГТС}$ и частотой $F_{ГТС}$, причем значение $F_{ГТС}$ превышает верхнюю границу частотного диапазона измерения давления рабочей среды.

Зависимость пьезоэлектрического напряжения, которое возникает в пьезоэлементе датчика и пропорционально силе F от деформации мембраны датчика при действии давления P рабочей среды, используется для получения сигнала о давлении, поступающем на мембрану датчика давления.

Для измерения температуры пьезоэлектрическим датчиком давления авторами предлагается использовать зависимость падения амплитудного значения напряжения токового сигнала $I_{ГТС}$ на комплексном сопротивлении пьезоэлемента $Z_{ПЭ}$ датчика от температуры, а именно: изменение емкости пьезоэлемента $C_{ПЭ}$ от температуры.

Электрический сигнал, который снимается с электродов пьезоэлемента, усиленный усилителем широкополосным УШ, поступает на вход фильтра полосового ФП с нижней границей полосы пропускания, которая превышает максимальную частоту диапазона изменения пульсации давления рабочей среды, и на фильтр нижних частот ФНЧ с полосой пропускания, соответствующей диапазону изменения частоты давления рабочей среды (рис. 2).

Микроконтроллером МК устройства коррекции на основании полученной при предварительной настройке датчика зависимости выходного сигнала датчика от температуры рабочей среды, зависимости пьезоэлектрического напряжения от давления рабочей среды и зависимости комплексного сопротивления $Z_{ПЭ}$ от температуры рабочей среды вычисляется сигнал коррекции ошибки измерения давления от температуры и производится преобразование скорректированного сигнала о значении давления рабочей среды в цифровой выходной сигнал в виде кода $N_{ВЫХ}$ и аналоговый выходной сигнал в виде напряжения $U_{ВЫХ}$.

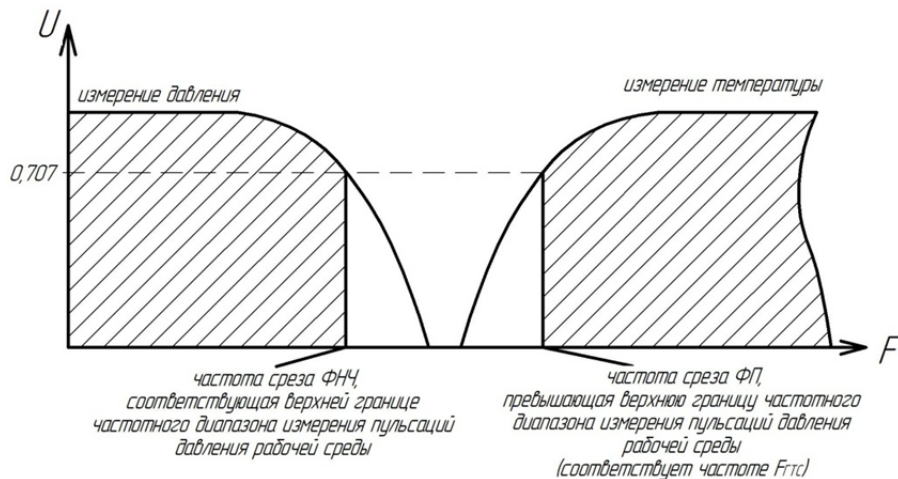


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ и ФП

Коэффициент преобразования датчика давления, который содержит пьезоэлемент, работающий на продольном пьезоэффекте (рабочим является пьезомодуль d_{33}), как функция температуры на основании данных, указанных в [6], имеет вид

$$K(T) = \frac{d_{33}(T) \frac{L_3}{L_0} \left(\frac{1}{\frac{1}{\rho(T) \frac{h}{L_3}} + \frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_y}} \right) \cdot F_{ГТС}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\frac{1}{\rho(T) \frac{h}{L_3}} + \frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_y}} \right)^2 \left(\varepsilon_{33}(T) \frac{L_3}{h} + C_k + C_y \right)^2 \cdot F_{ГТС}^2}}, \quad (1)$$

где $d_{33}(T)$, $\varepsilon_{33}(T)$, $\rho(T)$ – соответственно пьезомодуль, диэлектрическая проницаемость и удельное объемное сопротивление пьезокерамического материала при температуре T ; $F_{ГТС}$ – частота, заданная генератором стабильного синусоидального тока; $L_{эфм}$ – эффективная площадь мембраны датчика; L_0 , L_3 и h – соответственно площадь торцевой поверхности пьезоэлемента, площадь электродов одного слоя пьезоэлемента и расстояние между электродами пьезоэлемента; C_k , C_y – соответственно электрическая емкость кабеля и входных каскадов усилителя; R_k , R_y – соответственно сопротивление кабеля и входных каскадов усилителя.

Информативным параметром пьезоэлемента по температуре является емкость $C_{ПЭ}$, и на основании закона Ома, по которому падение напряжения от протекающего стабильного синусоидального тока на емкостном сопротивлении пропорционально модулю комплексного сопротивления:

$$|U_{ПЭ}| = |I_{ГТС}| \cdot |Z_{ПЭ}| = I_{ГТС} \frac{R_{ПЭ} \frac{1}{j\omega C_{ПЭ}}}{R_{ПЭ} + \frac{1}{j\omega C_{ПЭ}}}, \quad (2)$$

где

$$\omega = 2\pi F_{ГТС}; \quad (3)$$

$I_{ГТС}$, $F_{ГТС}$ – соответственно амплитуда и частота генерации стабильного синусоидального тока, задаваемого ГТС; $C_{ПЭ}$ – емкость пьезоэлемента датчика давления.

При выполнении соотношения $R_{ПЭ} \gg \left| \frac{1}{j\omega C_{ПЭ}} \right|$ выражение (2) упрощается и принимает вид

$$U_{ГТС} = I_{ГТС} \frac{1}{\omega C_{ПЭ}}. \quad (4)$$

Изменение емкости пьезоэлемента $C_{ПЭ}$ от воздействия на пьезоэлемент деформации мембраны датчика с силой, пропорциональной пульсации давления рабочей среды, во всем диапазоне измерения пульсаций давления составляет практически примерно 0,5 % от номинального значения емкости пьезоэлемента, поэтому это изменение емкости не учитывается при расчетах в (1)–(4).

Зависимость напряжения выходного сигнала U_T , поступающего на вход выпрямителя прецизионного ВП1, от температуры имеет вид

$$U_T(T) = U_{ПЭ}(T) K_{УШУ} K_{ФП}, \quad (5)$$

где

$$U_{ПЭ}(T) = I_{ГТС} \frac{1}{2\pi F_{ГТС} C_{ПЭ}(T)} - \quad (6)$$

зависимость падения напряжения на реактивном сопротивлении $Z_{ПЭ}$ от изменения емкости $C_{ПЭ}(T)$; $I_{ГТС}$ – амплитуда синусоидального тока, задаваемого генератором тест-сигнала (ГТС); $C_{ПЭ}(T)$ – емкость пьезоэлемента датчика давления как функция температуры; $K_{УШУ}$ – коэффициент усиления усилителя широкополосного; $K_{ФП}$ – коэффициент передачи фильтра полосового.

Был проведен эксперимент с целью выявления зависимости изменения емкости модуля пьезокерамического ПМ 7-02 (пьезоэлемента), который применяется в серийно изготавливаемых в НИИФИ преобразователях акустического давления ДХС 514 [6, 7], от температуры рабочей среды для определения целесообразности использования зависимости при построении схемы устройства коррекции.

На рис. 3 приведена зависимость емкости пьезоэлемента от температуры рабочей среды в диапазоне от минус 196 до 25 °С. Кривые «1» и «2» получены путем охлаждения пьезоэлемента, который первоначально находится при температуре 25 °С.

На участках кривой 1 (справа налево) от 25 до минус 50 °С и от минус 150 до минус 180 °С и на участках кривой 2 (справа налево) от 25 до минус 100 °С и от минус 100 до минус 180 °С видны «волны» – реакция пьезоэлемента на долив жидкого азота в приспособление для испытаний. В течение 30–45 с после долива колебание значения емкости составляло примерно ± 300 пФ, среднее значение емкости пьезоэлемента в это время возрастало.

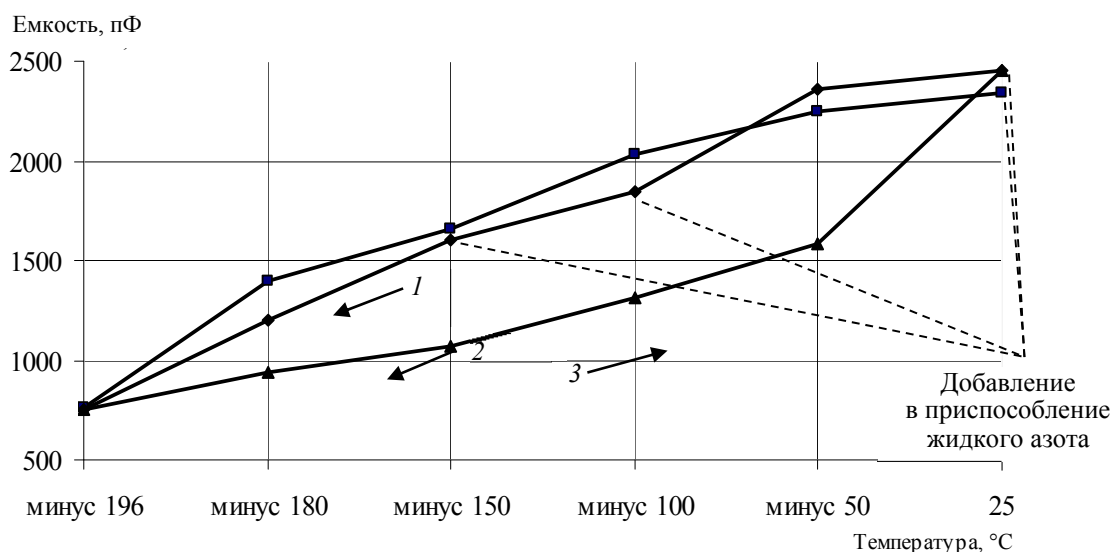


Рис. 3. Зависимость емкости модуля пьезокерамического ПМ 7-02 от температуры (стрелками указано направление изменения температуры рабочей среды)

Кривая 3 иллюстрирует изменение емкости при нагревании пьезоэлемента от температуры минус 196 до 25 °С. Видно влияние принудительного обдува пьезоэлемента при нагревании в диапазоне температур от минус 180 до минус 150 °С и от минус 50 до 25 °С.

Изменение емкости при снижении температуры от 25 до минус 196 °С составило примерно 1700 пФ, что в сравнении с номинальным значением емкости исследуемого пьезоэлемента 2450 пФ составляет примерно 70 %. Это означает, что зависимость может быть использована для получения сигнала коррекции температурной погрешности датчика давления.

Перед эксплуатацией датчик давления с подключенным устройством коррекции градуируется следующим образом:

- 1) задается динамическое давление измеряемой среды с постоянной частотой и амплитудой;
- 2) задается изменение температуры во всем температурном диапазоне измерения давления;
- 3) фиксируется изменение выходных сигналов по давлению и температуре при разных значениях температуры;
- 4) формируется индивидуальная математическая модель датчика в виде совокупности ее параметров, связывающей изменение значений выходного сигнала по давлению от температуры во всем температурном диапазоне измерения давления.

При эксплуатации датчика текущее значение давления определяется по параметрам индивидуальной математической модели и текущим измеренным значениям давления и температуры.

Описанное устройство коррекции температурной погрешности планируется к применению во вновь разрабатываемых изделиях ОАО НИИФИ, а также при модернизации ранее изготовленных пьезоэлектрических датчиков динамического давления.

Список литературы

1. Описание изобретения к патенту 2357577 С1 Российская Федерация. Многофункциональный измерительный модуль / Пауткин В. Е., Соломинская И. В.
2. Годагер Ойвинд. Сенсор Дивелопментс АС. Узел кварцевого измерительного преобразователя давления и температуры с динамической коррекцией // Заявка РСТ GB 2010.002201 20101130. Публикация РСТ: WO 2011.067556 201101130.
3. Описание изобретения к патенту 2275626 С2 Российская Федерация. Устройство для измерения влажности / Лукьянов С. П., Семенов А. В., Пашков В. А.
4. Нефедьев, Д. И. Датчики динамических давлений для сверхвысоких температур / Д. И. Нефедьев, П. Н. Ефимов, Б. В. Цыпин // Метрология. – 2013. – № 6. – С. 16–21.
5. Описание изобретения к патенту 2316759 С2 Российская Федерация. Измеритель влажности / Нурғалиев Н. М.
6. Богуш, М. В. Влияние температуры на коэффициент преобразования пьезоэлектрических датчиков / М. В. Богуш // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 2. – С. 26–39.
7. Датчики, преобразователи, системы : каталог продукции ОАО НИИФИ. – Пенза, 2011. – С. 70–98.

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 measurements

Шамраков Анатолий Леонидович

консультант главного конструктора направления,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: nik2@niifi.ru

Shamrakov Anatoliy Leonidovich

chief designer consultant,
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

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.