

***АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА
ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ***

Таишев С.Р.

аспирант,

Пензенский государственный университет,

Пенза, Россия

Аннотация: В статье представлены факторы, влияющие на стабильность датчиков переменных процессов на основе пьезокерамики. Показано, что температурные характеристики электрической ёмкости пьезоэлементов имеют зависимость во всем диапазоне температур, что позволяет их использовать в качестве параметра, несущего воздействия сигнала, количественно отображающего передаваемую информацию при разработке вторичных преобразователей для снижения дополнительной температурной погрешности. Предложены методы по минимизации дополнительной температурной погрешности в диапазоне температур от минус 80 до 180 °С. Полученные результаты показывают возможность коррекции дополнительной температурной погрешности датчиков переменных процессов путём использования электрической ёмкости в качестве информативного параметра.

Ключевые слова: датчик переменных процессов, пьезоэлемент, температурная погрешность, коррекция, ёмкость.

***ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE
CONVERSION RATIO SENSORS, VARIABLE PROCESSES BASED ON
PIEZOELECTRIC CERAMICS***

Taishev S. R.

Postgraduate student

Abstract: The article presents the factors affecting the stability of sensors of variable processes based on piezoceramics. It is shown that the temperature characteristics of the electrical capacitance of piezoelectric elements have a dependence over the entire temperature range, which allows them to be used as a parameter carrying the effect of the signal, quantitatively displaying the transmitted information in the development of secondary converters to reduce the additional temperature error. Methods for minimizing the additional temperature error in the temperature range from minus 80 to 180 ° C are proposed. The obtained results show the possibility of correcting the additional temperature error of the sensors of variable processes by using the electric capacitance as an informative parameter.

Keywords: variable process sensor, piezoelectric element, temperature error, correction, capacity.

Пьезоэлементы (ПЭ), входящие в состав датчиков быстропеременных процессов (ДПП), в значительной степени обуславливают их температурные параметры [1]. Соответственно, для повышения стабильности свойств пьезоэлементов в зависимости от температуры в диапазоне от минус 80 до 180 °С, необходимо проведения ряда исследований, направленных на уменьшение данного явления.

Воздействие температуры окружающей среды на ДПП обуславливают изменение параметров, прежде всего геометрических, как составных частей ДПП, включая ПЭ, так и их соединений. Кроме того, в самом ПЭ наблюдается дрейф объемной плотности, остаточной поляризации, диэлектрической проницаемости и модуля упругости ПЭ [2-4]. С учетом того, что характеристики электрических ёмкостей в зависимости от температуры коррелируют во всем диапазоне, а их отклонение от номинального значения

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

достигают 40 %, рассмотрим такие схемотехнические методы, когда в качестве параметра, несущего воздействия сигнала, количественно отображающего передаваемую информацию, будет использовано данное явление. В дальнейшем полученные выводы будут использованы при исследовании и проектировании вторичных преобразователей (ВП) [2, 5-8].

Типичный ДПП включает в свой состав ПЭ, мембрану и кабельную перемычку. Рассмотрим схему замещения ДПП, для которого диапазоны воздействующей вибрации (от 6 Гц до 8 кГц) и измерения переменных процессов (от 16 Гц до 18 кГц) не равны по своему значению его частоте резонанса (40 – 50 кГц) (рисунок 1) [5].

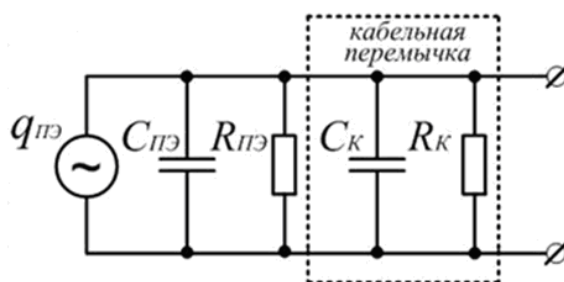


Рис. 1 – Пример схемы замещения ДПП.

Согласно принципу работы ДПП измеряемое давление (как переменный процесс) ΔP_A попадает на мембрану и с силой, пропорциональной измеряемому давлению, оказывает воздействие на ПЭ ДПП. На электродах ПЭ возникает поверхностный электрический заряд $q_{пэ}$, который через кабельную перемычку воспринимается ВП.

Если ΔP_A варьируется по гармоническому закону, а значение частоты f ниже резонансной частоты ДПП, то коэффициент преобразования данного переменного давления в выходной сигнал записывается как:

$$K_{\Delta P_A} = \frac{U_A}{\Delta F_A} = \frac{q_{пэ}(\Delta F_A) \cdot R \cdot \omega}{\Delta F_A \cdot \sqrt{1 + C^2 \cdot R^2 \cdot \omega^2}} \quad (1)$$

где U_A – значение выходного сигнала ДПП (на входе ВП);

$\Delta F_A = S_{эфф} \cdot \Delta P_A$ – сила, воздействующая на ПЭ;

$S_{эфф} = \pi \left(\frac{r + r_0}{2} \right)^2$ – площадь мембраны;

r – радиус мембраны;

r_0 – радиус силопередающего элемента.

$q_{ПЭ}(\Delta F_A) = d_{33}(\Delta F_A) \cdot \frac{S_{ПЭ}}{S_0} \cdot \Delta F_A$ – заряд, производимый ПЭ;

d_{33} – коэффициент пьезочувствительности ПЭ;

$S_{ПЭ}$ – площадь электродов ПЭ;

S_0 – площадь приложения силы ΔF_A ;

$C = C_{ПЭ} + C_K + C_{ВП}$ – электрическая ёмкость ДПП;

C_K , $C_{ПЭ} = \epsilon_{33} \cdot \frac{S_{ПЭ}}{h_{ПЭ}}$, $C_{ВП}$ – соответственно электрические емкости

кабельной перемычки, ПЭ и ВП;

$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{ПЭ}} + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_{ВП}}$ – обратное сопротивление ДПП;

R_K , $R_{ПЭ} = \tilde{\rho} \cdot \frac{h_{ПЭ}}{S_{ПЭ}}$, $R_{ВП}$ – соответственно электрические сопротивления

кабельной перемычки, ПЭ и ВП;

$\tilde{\rho}_{ПЭ}$, ϵ_{33} , $h_{ПЭ}$ – соответственно удельное объёмное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и расстояние между электродами ПЭ;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, где f – частота переменного давления.

Если во всем частотном диапазоне $R^2 \cdot C^2 \cdot \omega^2 \gg 1$, тогда зависимость напряжения на выходе ДПП U_A от измеряемого переменного давления ΔP_A равняется:

$$U_A = \frac{d_{33}}{C} \cdot S_{эфф} \cdot \Delta P_A. \quad (2)$$

На основании выражения (1) запишем напряжение на выходе ДПП (напряжение на входе ВП) U_A с учетом температуры ПЭ ДПП:

$$K_{\Delta F_A}(T) = \frac{U_A(T)}{\Delta F_A} = \frac{q_{ПЭ}(T) \cdot R(T) \cdot \omega}{\Delta F_A \cdot \sqrt{1 + C^2(T) \cdot R^2(T) \cdot \omega^2}} \quad (3)$$

где $q_{ПЭ}(T) = d_{33}(T) \cdot \frac{S_{ПЭ}}{S_0} \cdot \Delta F_A$; $C(T) = C_{ПЭ}(T) + C_K + C_{ВП}$;

$$\frac{1}{R(T)} = \frac{1}{R_{ПЭ}(T)} + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_{ВП}} ; C_{ПЭ}(T) = \varepsilon_{33}(T) \cdot \frac{S_{ПЭ}}{h_{ПЭ}} ; R_{ПЭ}(T) = \tilde{\rho}(T) \cdot \frac{h_{ПЭ}}{S_{ПЭ}} ;$$

где $\varepsilon_{33}(T)$, $\tilde{\rho}(T)$, $d_{33}(T)$ – соответственно диэлектрическая проницаемость, удельное объёмное сопротивление и коэффициент пьезочувствительности с учетом температуры T .

Экспериментальные результаты показывают, что электрическая емкость и ее изменения в зависимости от температуры (до 70%) являются приоритетными в качестве параметра, несущего воздействия сигнала, количественно отображающего передаваемую информацию, в отличие от электрического сопротивления, изменения которого в зависимости от температуры не значительны (до 1%) [9, 10].

Представим функцию преобразования измеряемого давления как переменного процесса в выходной сигнал:

$$U_A = f_A(\Delta P) = f_{АН} + b, \quad (4)$$

где $f_A(\Delta P)$ – реальная статическая функция преобразования измеряемого переменного давления в выходной сигнал;

$f_{АН}(\Delta P_A)$ – номинальная характеристика преобразования;

b – погрешность измерения переменного давления.

Опишем погрешность b в выходном сигнале ДПП U_A об измеренном переменном давлении ΔP_A , которая обуславливается температурой T и описывается в (4):

$$b = K(T) + B(T), \quad (5)$$

Изменения коэффициента $K(T)$ в последнем выражении обуславливают мультипликативную погрешность измерения переменного давления. На

основании теоретических и экспериментальных исследований известно, что температурная мультипликативная погрешность измерения переменного давления ДПП с ПЭ, который изготавливается по керамической технологии, составляет значение до 1 %, что является вполне приемлемым для большинства практических применений. Таким образом, можно исключить мультипликативную погрешность из дальнейшего рассмотрения. Соответственно, выражение (4) примет вид:

$$U_A = f_A(\Delta P) + B(T), \quad (6)$$

Изменения коэффициента $B(T)$ обуславливают аддитивную погрешность ДПП при измерении переменного давления ΔP . Так как прямой пьезоэлектрический эффект является основополагающим для функционирования ДПП, то при нулевом значении измеряемого переменного давления сигнал на выходе будет также равен нулю. Соответственно, будет отсутствовать аддитивная погрешность нулевого уровня.

Первые секунды работы ДПП не несут информации об измеряемом процессе. В это время происходит подготовка ДПП к функционированию во всем диапазоне температур. При этом значения аддитивной погрешности превышают требуемое значение относительной основной погрешности ДПП от термоудара. Однако, относительная основная погрешность не характеризует динамические измерения, которыми является временная зависимость выходного сигнала ДПП от температуры измеряемой среды, соответственно сопоставление с относительной основной погрешностью приводится для наглядности, так как она не характеризует такие динамические измерения, как временная зависимость выходного сигнала ДПП от окружающей температуры. Величина τ , называемая временем установления выходного сигнала ДПП, характеризует длительность времени, в течение которого выходной сигнал ДПП является неинформативным. Значения к данному параметру обычно устанавливаются экспериментально при эксплуатации ДПП и изначально не

предъявляются. Также, измерения переменного давления не осуществляются в течение определенного временного промежутка, когда происходит стабилизация выходного сигнала при переходных процессах в ДПП и его составных частях от воздействия термоудара, при этом значения сигнала на выходе ДПП считаются неинформативными. Соответственно, путём предварительной настройки ДПП возможно реализовать измерения в течение времени τ в условиях воздействия величин, максимально приближенных к эксплуатации.

Дополнительная температурная погрешность при воздействии термоудара рабочей среды сложно поддается анализу и моделированию, что обусловлено относительно низким уровнем исследования данного процесса, что вызывает затруднения при определении ее значений. Решение данной проблемы, а также повышение точности измерения ДПП, например, в течение 14-16 с возможно путём индивидуальной настройки ВП каждого ДПП. ВП ДПП настраивается при начальной эксплуатации, используя фактические изменения воздействия температуры и измеряемого переменного давления. Затем следует стадия калибровки ДПП перед дальнейшей эксплуатацией в условиях, максимально приближенных к реальным, с точки зрения изменения температуры и измеряемого переменного давления.

Значение сигнала на входе ВП, обусловленного изменением температуры равно:

$$U_A^{T'}(\Delta T) = \frac{q_{ПЭ}(\Delta T) \cdot S_{ПЭ} \cdot R \cdot \omega}{\sqrt{1 + C^2 \cdot R^2 \cdot \omega^2}} \quad (7)$$

При анализе ДПП в качестве многомерного датчика, обладающего функцией коррекции температурной погрешности, две физических величины измеряются одновременно – температура T ПЭ и переменное давление ΔP_A . При этом динамические свойства ДПП и вторичного преобразователя не влияют на точность измерений этих значений, так как

скорость измерения величин ΔP_A , T с помощью ВП во много раз больше скорости изменения значений этих величин. А воздействием корректирующего сигнала осуществляется коррекция температурной погрешности измерения ΔP_A путем приближения реальной статической функции преобразования $f(\Delta P)$ к номинальной характеристике преобразования $f_H(\Delta P)$.

Уменьшение температурной погрешности измерения переменного давления обычно осуществляется следующим методом: выходные сигналы U_A , U_T с ДПП об измеренных значениях ΔP_A , T соответственно поступают в ВП, который вычисляет значение корректирующего сигнала b_k с учётом полученных при калибровке и известных номинальных значений ΔP_{AH} . В точке суммирования $\sum \Delta P$ образуется разность:

$$U_A = U_A - U_{B(T)} = f_A(\Delta P_A) - b_k = f_{AH}(\Delta P_A) + B(T) - b_k, \quad (8)$$

где b_k – сигнал коррекции, определенный ВП.

Таким образом, на основе представленного анализа возможно достичь повышения термостабильности свойств ДПП на основе ПЭ в диапазоне температур от минус 80 до 180 °С путём использования электрической ёмкости ПЭ в качестве параметра, несущего воздействия сигнала, количественно отображающего передаваемую информацию относительно температуры. При этом возможно разделение сигналов для измерения переменного процесса и температуры за счет соответствующего выбора частоты тестового сигнала для измерения электрической ёмкости ПЭ. Уменьшение дополнительной температурной погрешности и всех составляющих погрешности измерения переменного процесса достигается использованием полученных информативных сигналов при обработке микроконтроллером, не ограничивая частотный диапазон измерения за счёт выбора частоты тестового сигнала, которая превышает верхнее значение частоты диапазона измеряемого переменного процесса.

Библиографический список

1 Taymanov R. and Sapozhnikova K. Intelligent measuring instruments. Maximum reliability of measuring information, minimum metrological maintenance // Proceedings of XVII IMEKO World Congress. Dubrovnik, Croatia, 2003, P. 1094 - 1097.

2 Тайманов Р.Е., Сапожникова К.В. Интеллектуализация встроенных средств контроля как способ повышения надежности оборудования // Проблемы машиноведения. Точность, трение и износ, надежность, перспективные технологии, под общей редакцией В.П.Булатова.-С.-Пб.: Наука, 2005 г., С. 421-469.

3 Taymanov R., Sapozhnikova K. Metrological self-check and evolution of metrology // Measurement. Vol.43, 2010, № 7, С. 869 -877.

4 Henry M. P. and Clarke D. W. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples // Control Engineering Practice. Vol. 1. 1993, № 4, P. 585-610.

5 Barberree D. Dynamically self-validating contact temperature sensors // Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry. AIP Conference Proceedings. Ripple D. C. et al (Eds.). New York, Melville, Vol 7, 2003, P. 1097-2001.

6 Е.А. Мокров, И.Н. Баринов, П.Н. Цибизов. Полупроводниковые пьезочувствительные элементы микроэлектронных датчиков давлений // Основы проектирования и разработки: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009.–104 с.

7 Баринов И.Н., Волков В.С. Повышение долговременной стабильности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давлений // Приборы.– 2010.–№3.–С. 9-15.

8 ГОСТ 8.009-84 Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М., 2003, 27 с. (Государственная система обеспечения единства измерений).

9 Хахо И.Х. Динамическая коррекция сейсмических сигналов в задаче анализа качества и надежности электрооборудования // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 5. С. 138 -143.

10 Янчич В.В., Иванов А.А., Орехов В.С. и др. Способы проверки и калибровки пьезоэлектрических акселерометров с изгибными элементами // Труды VI международной научно-технической конференции «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий». - Ростов-на-Дону, изд-во Ростовского государственного педагогического университета, 2008. С. 176-179.

Оригинальность 78%