

**М.В. Богуш, канд. техн. наук.**

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

Предложены алгоритмы для количественного описания изменения коэффициента преобразования пьезоэлектрических датчиков от температуры на основании комплексного учета температурных изменений характеристик пьезокерамических материалов (пьезоэлектрических модулей, диэлектрической проницаемости и удельного объемного сопротивления) и экспериментально показана их достоверность при корректных методиках измерения последних.

Для анализа предполагаемых температурных характеристик пьезоэлектрических датчиков при проектировании необходимо знать детерминированную связь между изменениями от температуры электрофизических параметров пьезокерамических материалов (ПКМ) и температурными изменениями коэффициента преобразования (КП) датчиков, выполненных на их основе.

В научной литературе до сих пор нет однозначного мнения на этот счет. Различные авторы [1-4] утверждают, что температурные уходы КП зависят от температурных изменений:

- пьезомодуля;
- диэлектрической проницаемости;
- сопротивления изоляции;
- свойств клеевого шва;
- условий контакта между деталями.

Каждый из этих механизмов может вносить вклад в температурные изменения КП. Но желательно определиться, что является неизбежным, а чем можно управлять.

Для анализа связи между температурными характеристиками ПКМ и КП рассмотрим функцию преобразования пьезоэлектрического датчика, предполагая, что датчик содержит пьезоэлемент (ПЭ), работающий на продольном пьезоэффекте, т.е. рабочим является пьезомодуль  $d_{33}$ . При этом характеристики ПКМ ( $d_{33}$ ,  $\epsilon_{33}$  и  $\rho$ ) считаем функциями температуры, а температурными изменениями плотности материалов, геометрических размеров деталей, а также параметров усилителя и кабеля пренебрегаем. Эти предположения являются вполне оправданными, т.к. коэффициенты линейного теплового расширения материалов составляет около  $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , а усилитель, как правило, находится вне зоны влияющих факторов. В этом случае коэффициент преобразования силы в напряжение на входе усилителя как функцию температуры  $K(T)$  можно выразить следующими соотношениями:

$$K(T) = \frac{\varphi_o(T)}{X} = \frac{q(T)R(T)\omega}{\sqrt{1 + R^2(T)C^2(T)\omega^2}} \quad (1)$$

$$q(T) = d_{33}(T) \frac{L_3}{L_1} \quad (2)$$

$$C(T) = C_{\text{п}}(T) + C_{\text{к}} + C_{\text{у}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{R(T)} = \frac{1}{R_{\text{п}}(T)} + \frac{1}{R_{\text{к}}} + \frac{1}{R_{\text{у}}} \quad (4)$$

$$C_{\text{п}}(T) = \varepsilon_{33}(T) \cdot \frac{L_3}{h} \quad (5)$$

$$R_{\text{п}}(T) = \tilde{\rho}(T) \frac{h}{L_3} \quad (6)$$

где  $d_{33}(T)$ ,  $\varepsilon_{33}(T)$  и  $\tilde{\rho}(T)$  - соответственно пьезомодуль, диэлектрическая проницаемость и удельное объемное сопротивление ПКМ при температуре  $T$ ,  $L_3$  и  $h$  - площадь электродов ПЭ и расстояние между ними,  $R_{\text{п}}$ ,  $C_{\text{п}}$ ,  $R_{\text{к}}$ ,  $C_{\text{к}}$ ,  $C_{\text{у}}$ ,  $R_{\text{у}}$  - сопротивление и электрическая емкость соответственно ПЭ (индекс «П»), кабеля (индекс «К») и входных каскадов усилителя (индекс «У»).  $X$  - сила, действующая на ПЭ, связанная с информационными параметрами датчиков известными соотношениями:  $X=F$  - для датчиков силы,  $X=ma$  - для датчиков ускорения,  $X=PL_{\text{эфм}}$  - для датчиков давления.  $F$ ,  $a$ ,  $P$  - измеряемые усилие, ускорение или давление.

Предполагаем, что связь между температурными изменениями характеристик ПКМ и КП пьезоэлектрического датчика соответствует соотношения (1 – 6).

С целью экспериментальной проверки этих положений в диапазоне температуры  $-196...+500^{\circ}\text{C}$  проведены комплексные испытания пьезокерамики ТВ-2 и серийно выпускаемых многослойных монокристаллических модулей ПМ-2 и ПМ-3 [5], изготовленных из того же сырья. Результаты испытаний сопоставлены с соответствующими параметрами датчиков пульсации давления ВТ-306, ВТ-307. ВТ-308 [6] с ПЭ данной конструкции.

Исследование свойств пьезоматериалов осуществлялось на образцах в виде дисков  $\varnothing 10 \times 1$  мм, изготовленных в качестве пробников перед запуском данной партии сырья в производство. Перед испытаниями образцы были подвергнуты термотренировке, аналогичной термотренировке модулей, и заключающейся в прогреве до температуры  $210^{\circ}\text{C}$  (ПМ-3) и  $410^{\circ}\text{C}$  (ПМ-2). Измерения зависимости пьезомодуля  $d_{33}(T)$  выполнялись на установке Дон-4 на частоте 80 Гц. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{33}(T)$  определялись с помощью моста ВМ484 на частоте 1592 Гц. Измерение удельного объемного сопротивления ПКМ в диапазоне температуры осуществлялось двумя методами: омметром Е6-13А в постоянном электрическом поле величиной 10 В/мм ( $\rho$ ) и мостом ВМ484, как величина обратная активной составляющей проводимости на частоте 1592 Гц ( $\tilde{\rho}$ ).

Относительные температурные изменения пьезомодуля, диэлектрической проницаемости, а также удельного объемного сопротивления в постоянном и

переменном электрическом поле керамики ТВ-2 показаны на рис.1. Индекс «0» соответствует значению параметра при нормальной температуре

В нормальных условиях величина  $\epsilon_{33}$  ТВ-2 составила  $154 \pm 5$ , а пьезомодуль  $d_{33}$  -  $15,7 \pm 2$  пКл/Н. Доверительные интервалы здесь и далее указываются с вероятностью 0,95.

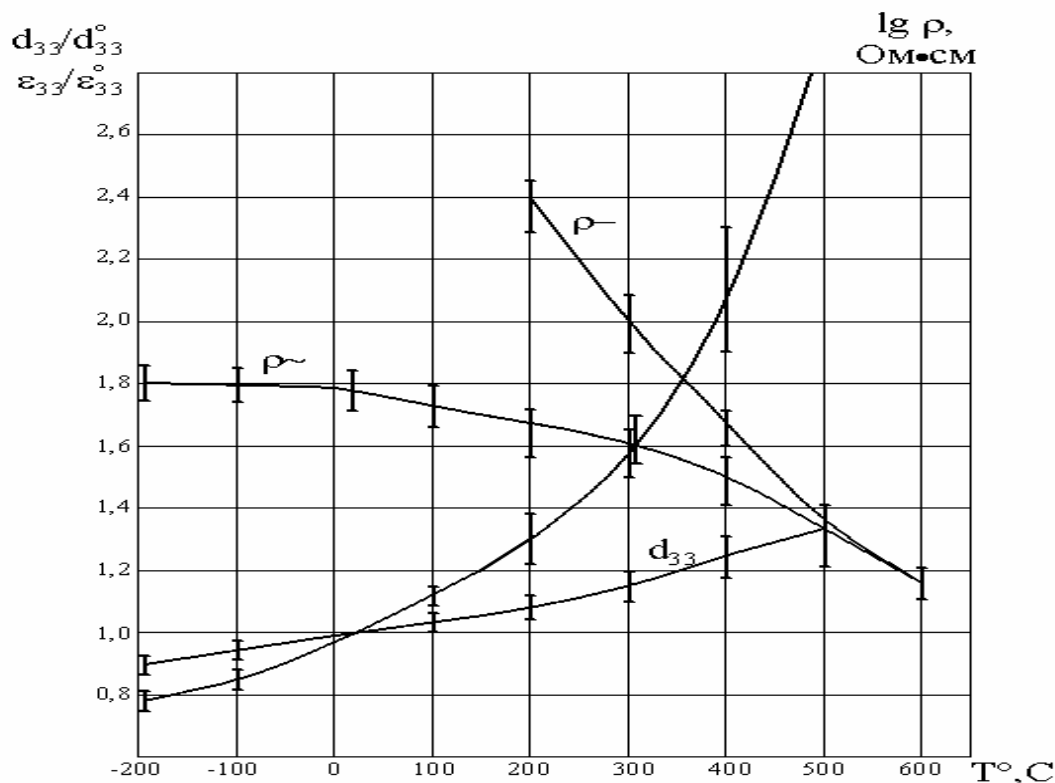


Рис. 1. Относительные температурные изменения пьезомодуля, диэлектрической проницаемости, а также удельного объемного сопротивления в постоянном и переменном электрическом поле керамики ТВ-2.

Модули ПМ-2 и ПМ-3 созданы в виде многослойных монолитных пакетов, конструкция которых показана в каталоге НКТБ «Пьезоприбор РГУ [5], а геометрические размеры в табл. 1.

Таблица 1.

Тип	d, мм	$L_0, \text{ см}^2$	$L_1, \text{ см}^2$	h, мм	n	H, мм
ПМ-2	5,7	0,26	0,18	0,6	5	6,3
ПМ-3	5,7	0,26	0,13	0,3	11	6,0

В табл. 1 d и H – диаметр и высота модулей, n – количество рабочих слоев, h – толщина одного слоя,  $L_1$  и  $L_0$  – площадь электродов одного слоя и площадь торцевой поверхности модуля.

Основные электрофизические характеристики модулей, рассчитанные по формулам (1 – 6) и полученные экспериментально, приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что наблюдаются хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными значениями параметров модулей, как в нормальных

условиях, так и при повышенных температурах. Расхождение расчета с опытными данными не превышает 15% для электрической емкости и коэффициента преобразования и 30% для сопротивления изоляции. Это свидетельствует о том, что с помощью формул (1 – 6), зная характеристики ПКМ, можно достаточно надежно прогнозировать ожидаемые параметры чувствительного элемента (ЧЭ) сложной формы.

Таблица 2.

Наименование параметра	ПМ-2		ПМ-3	
	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
Электрическая емкость, пФ	$235 \pm 8$	$263 \pm 72$	$605 \pm 20$	$640 \pm 120$
Коэф. преобразования при $C=5000$ пФ, мВ/Н	$103 \pm 11$	$92 \pm 16$	$176 \pm 18$	$174 \pm 42$
Сопротивление изоляции при температуре, Ом $200^{\circ}\text{C}$ ( $\times 10^9$ ) $400^{\circ}\text{C}$ ( $\times 10^7$ )	$1,5 \pm 0,6$	$1,2 \pm 0,5$	$9,2 \pm 6$	$6,6 \pm 4$
Изменение коэф. преобразования от температуры, % $-196 \dots 20^{\circ}\text{C}$ $20 \dots 200^{\circ}\text{C}$ $20 \dots 400^{\circ}\text{C}$	- 10 - +12	$-8 \pm 3$ - $+13 \pm 5$	- 8 + 7 -	$-5 \pm 4$ $+9 \pm 5$ -

На рис. 2. показаны относительные изменения КП модулей ПМ-2 и ПМ-3 от температуры, полученные расчетным путем (кривые 1-4) и экспериментально (кривые 5-8).

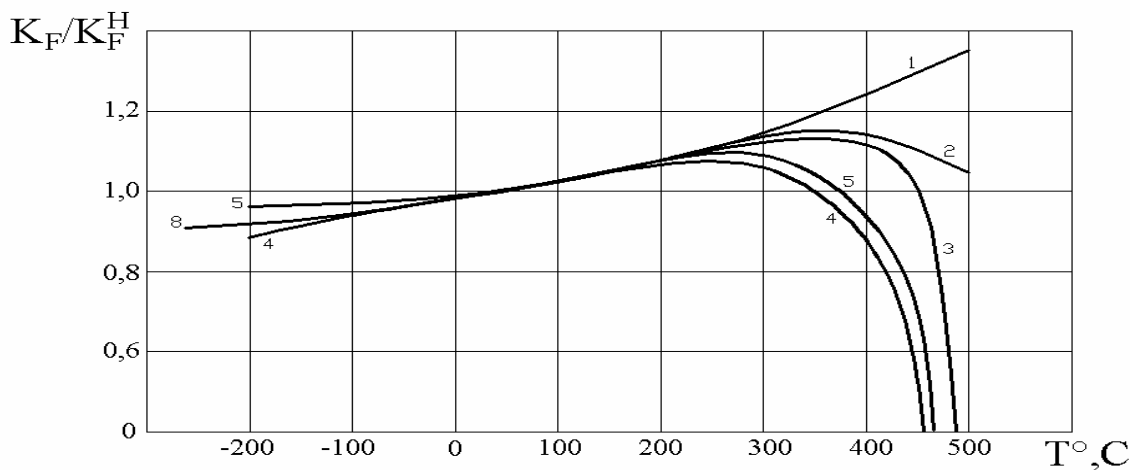
Кривые (1-4) иллюстрируют вклад различных характеристик ПКМ в температурные изменения КП. Кривая 1 является, функцией только  $d_{33}(T)$ . Изменения других параметров с температурой не учтены. Кривая 2 является функцией  $d_{33}(T)$  и  $\epsilon_{33}(T)$ . Кривые 3 и 4 учитывает также и изменение удельного объемного сопротивления с температурой. Причем в кривой 3 в расчетах приняты изменения  $\rho^-(T)$ , а в кривой 4 -  $\tilde{\rho}(T)$ . Кривая 5 получена экспериментальным путем в результате испытаний модулей на установке Дон-4. Здесь же на рис. 2 приведены температурные изменения КП датчиков ВТ-307 (6) ВТ 308 (7), ВТ 306 (8), выполненных на основе модулей ПМ-2 и ПМ-3 по данным предприятия изготовителя изделий.

Анализ рис. 2 свидетельствует о том, что температурные изменения КП ЧЭ и датчиков на их основе могут быть достаточно хорошо описаны только при комплексном учете свойств ПКМ с помощью соотношений (1 – 6). При этом важное значение имеют методики измерения характеристик ПКМ: зависимость

$d_{33}(T)$  должна измеряться квазистатическим методом,  $\epsilon_{33}(T)$ ,  $\tilde{\rho}(T)$  - в переменном электрическом поле на звуковых частотах.

В интервале температур  $-196 \dots 350^\circ\text{C}$  расхождение между расчетной кривой 4 с экспериментальными данными не превышает  $\pm 3\%$ , а в диапазоне от  $350$  до  $500^\circ\text{C}$  -  $\pm 6\%$ . При этом датчики с моноблочными ПЭ полностью воспроизводят свойства ПКМ, и их характеристики не зависят от температурных свойств соединительных переходов между рабочими элементами.

а



б

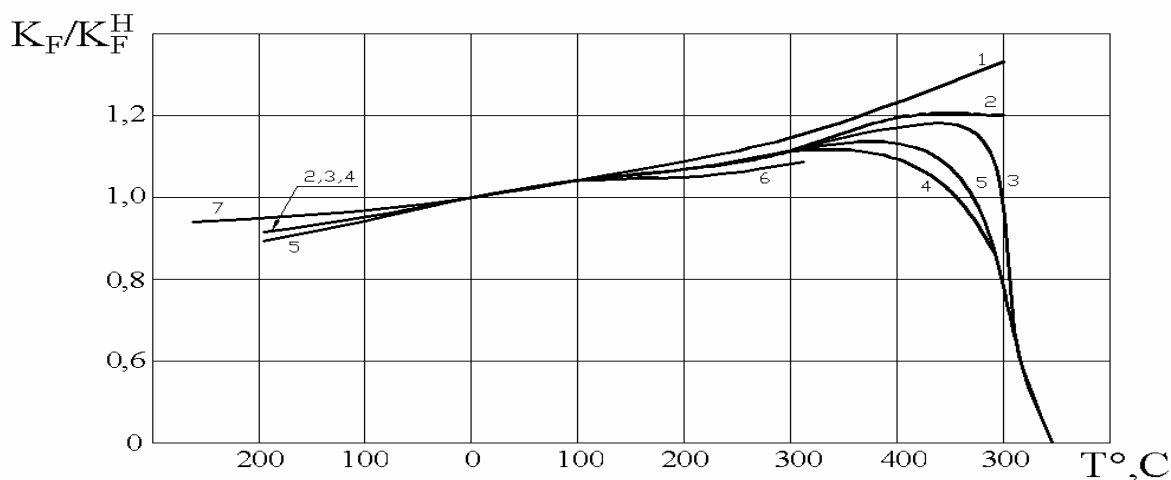


Рис. 2. Относительные температурные изменения КП модулей ПМ-2 (а) и ПМ-3 (б) и датчиков ВТ-307 (6) ВТ 308 (7), ВТ 306 (8), выполненных на их основе.

Соотношения (1–6), описывающие количественно температурные изменения КП датчиков в зависимости от температурных свойств ПКМ, геометрии ПЭ и входных параметров вторичных преобразователей могут быть использованы для решения различных прикладных задач, например:

1. Прогнозирования температурных характеристик пьезоэлектрических датчиков предполагаемой конструкции при изготовлении их на основе тех или иных ПКМ.

2. Оптимизации геометрии ЧЭ и входных параметров вторичных преобразователей для минимизации температурной погрешности датчиков в заданном интервале температур.

Для иллюстрации этих положений приведен рис. 3, на котором показаны зависимости КП от температуры модулей ПМ-7 при различных соотношениях между емкостью модуля и входной емкостью усилителя напряжения. Отметим, что модули ПМ-7 выполнены методом шликерного литья из керамики ЦТС-83Г и имеют форму цилиндра, работающего на поперечном пьезоэффекте [5].

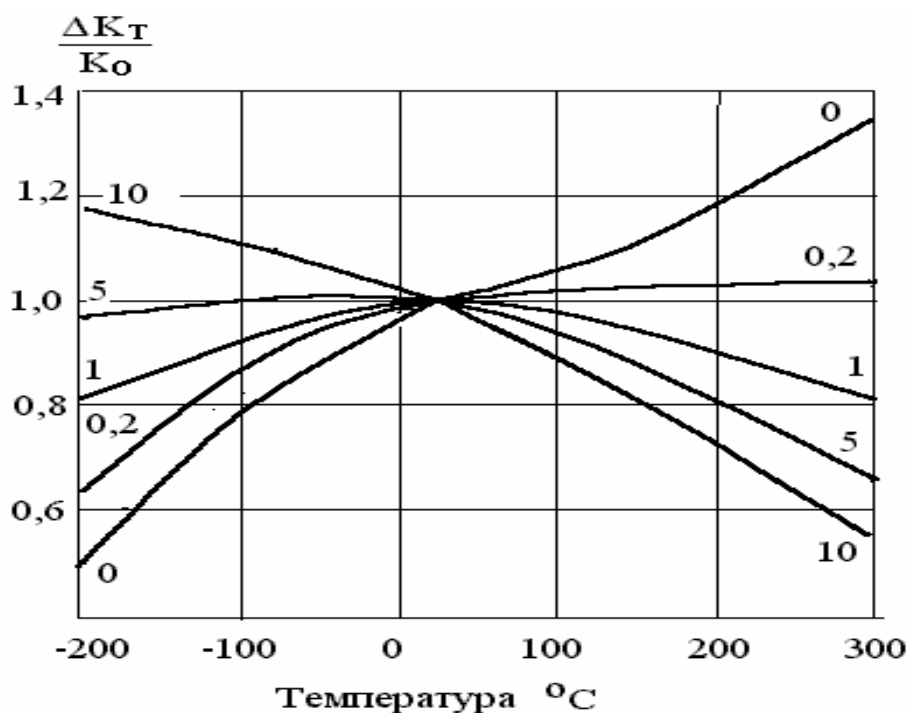


Рис. 3. Относительные изменения КП модулей ПМ-7 от температуры при различных соотношениях емкости модуля к входной емкости усилителя напряжения (цифры у кривых).

Из рис. 3 видно, что, варьируя емкость нагрузки, можно минимизировать температурные погрешности датчиков в определенном интервале температуры. Например, при работе в интервале от минус 60 до 300 °С целесообразно в качестве согласующего использовать усилитель напряжения с входной емкостью, которая в 5 раз превышает емкость ПЭ. При работе датчика при криогенных температурах, например от минус 196 до 60 °С, желательно использовать усилитель напряжения с малой входной емкостью, по крайней мере, в 5 раз меньше емкости ПЭ. Минимизация температурных уходов чувствительности в интервале  $\pm 60$  °С достигается, когда соотношение емкостей ПЭ и нагрузки близко к единице.

Отметим также, что, если температурная зависимость КП датчика не удовлетворяет соотношениям (1 – 6) – это значит, что в ЧЭ датчика имеются деструктивные факторы: скольжение деталей, пластические деформации клеевой прослойки, и т.п. Такая конструкция является ненадежной, нетехнологичной и недолговечной. Это показали многочисленные эксперименты и наш опыт выпуска различных пьезоэлектрических датчиков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Янчич В.В., Крамаров О.П., Кравцов В.А. Монолитные пьезокерамические виброизмерительные преобразователи. В сб. Пьезоэлектрические материалы и преобразователи. Изд-во РГУ, Ростов-на-Дону» 1976, с 161-163.
2. Дуднаков Б.И., Санин Е.И., Майковская А.И. Исследование температурной стабильности пьезоэлектрических виброизмерительных преобразователей различного типа. В сб.: Пьезоэлектрические материалы и преобразователи. Изд.-во РГУ, Ростов-на-Дону, 1977, с 110-116.
3. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ Под общ. ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение. 1979. -480 с.
4. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в трех томах./Т.1 (Кн. 2) Под общ. ред. Ю.Н. Коптева; Под ред. Е.Е. Багдатьяна, А.В.Гориша, Я.В.Малкова. – М.: ИПРЖР, 1999 –548 с.
5. Средства пьезоэлектрического приборостроения. Каталог – 90, Ростов-на-Дону, ОКБ Пьезоприбор РГУ, 1990, 115 с.
6. Датчики и преобразующая аппаратура. Каталог НИИ Физических измерений.- Пенза, 2001, 157с.

*Богуш Михаил Валерьевич – канд. техн. наук, зам. директора НКТБ «Пьезоприбор» Южного Федерального Университета г. Ростов-на-Дону.*

Тел. (863) 299-50-80, факс 290-58-22, E-mail: [piezo@inbox.ru](mailto:piezo@inbox.ru).