

О НОРМИРОВАНИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДАТЧИКОВ.

В.М.Стучебников

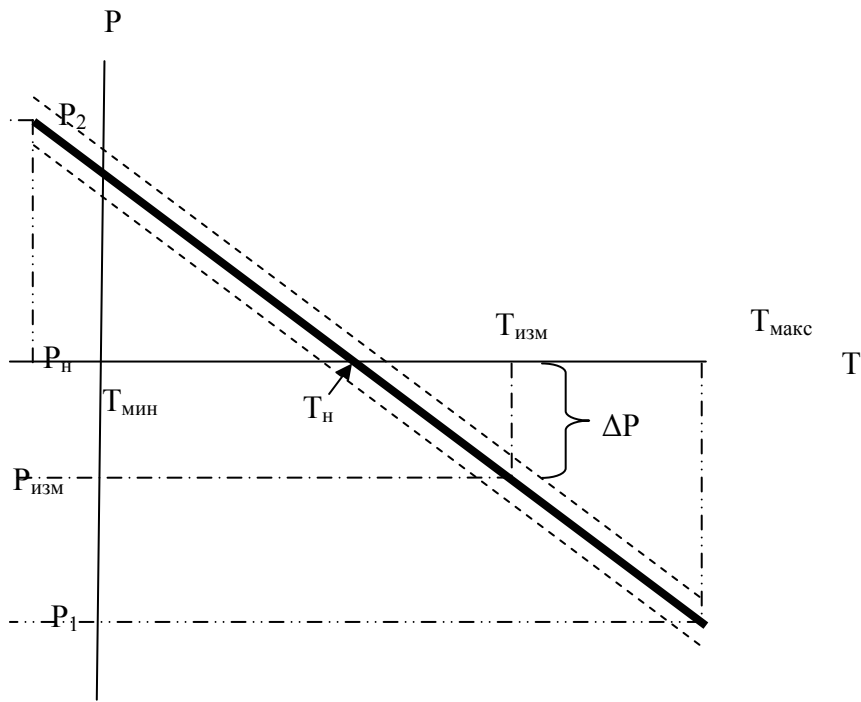
Дополнительная температурная погрешность является важной характеристикой датчиков механических величин, определяющей погрешность их измерения. Поэтому эта величина всегда указывается в числе основных параметров этих датчиков. Большинство производителей нормирует дополнительную температурную погрешность с помощью линейного температурного коэффициента, т.е. в процентах от диапазона изменения выходного сигнала датчика на один или десять градусов Цельсия (или Фаренгейта в англоязычных странах). При этом, как правило, предполагается, что знак температурной погрешности может быть любой, так что обычно она указывается как $\pm \gamma \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ (или $\pm \gamma \text{ } \%/10^{\circ}\text{C}$). Так рекомендуют нормировать температурную погрешность и нормативные документы МЭК (например, [1]), а вслед за ними российские стандарты (например, [2]).

В настоящей статье рассмотрены недостатки такого метода нормирования дополнительной температурной погрешности датчиков механических величин, особенно явно проявляющиеся в тензорезисторных полупроводниковых датчиках, которые сегодня составляют большинство используемых датчиков давления, силы, параметров движения и т.д. В конкретных примерах используются тензорезисторные датчики давления на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» (КНС) [3,4], широко распространенные в России.

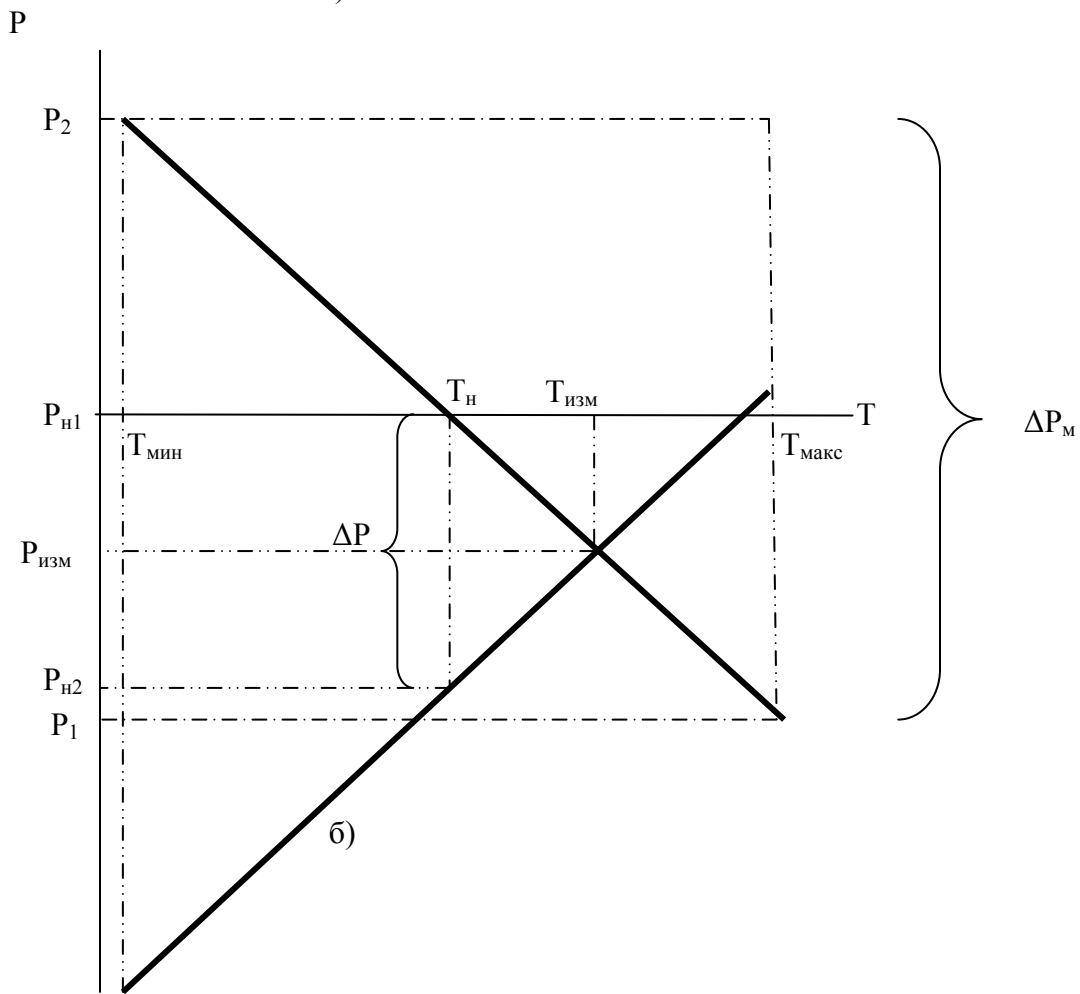
Совершенно очевидно, во-первых, что указанное нормирование имеет смысл только при линейной зависимости выходного сигнала датчика от температуры. Однако линейная аппроксимация температурной зависимости выходного сигнала тензорезисторного датчика с приемлемой степенью точности может быть использована лишь для датчиков с металлическими тензорезисторами и/или в сравнительно небольшом интервале температур. Поскольку для полупроводников характерна сильная и нелинейная зависимость параметров от температуры, то и выходной сигнал полупроводниковых тензорезисторных датчиков, как правило, существенно нелинейно зависит от температуры, что особенно заметно при работе в широком диапазоне температур.

Во-вторых, указанное нормирование фактически дезориентирует потребителя, заставляя его удваивать реальную погрешность измерений. Дело в том, что у конкретных датчиков с линейной температурной зависимостью выходного сигнала наклон этой зависимости имеет вполне определенный знак, так что сигнал может только либо убывать, либо возрастать с температурой. Имея нормирование температурной погрешности в $\%/^{\circ}\text{C}$ с указанием определенной величины и знака, потребитель может реально оценить и учесть погрешность измерения, например, давления, при определенной температуре; однако, если знак не определен, то и неопределенность измерения сильно возрастает.

Сказанное поясняется рис.1.



а)



б)

Рис.1. Температурная погрешность измерения давления при линейной зависимости выходного сигнала датчика от температуры в случае отрицательного (а) и неопределенного (б) знака линейного температурного коэффициента γ .

На рис.1а показан случай, когда измеряемое давление (пропорциональное выходному сигналу датчика) линейно падает с ростом температуры. В этом случае при известной температуре $T_{изм}$ потребитель может учесть температурную погрешность и привести измеряемое датчиком давление $P_{изм}$ к фактическому давлению P_n , которое нормируется при «нормальной» температуре T_n :

$$P_n = P_{изм} - \gamma^*(T_{изм} - T_n), \quad (1)$$

где γ – наклон зависимости $P(T)$ ($\gamma < 0$). Конечно, при этом, как минимум, сохраняется неопределенность фактического давления, определяемая основной погрешностью датчика (полоса, ограниченная штриховыми прямыми на рис.1а).

Совершенно по-другому обстоит дело, когда знак температурной погрешности не определен (рис.1б). В этом случае даже при известной температуре измерения неопределенность измеряемого давления составляет $\Delta P = (P_{n1} - P_{n2})$ даже без учета основной погрешности датчика.

Конечно, если температура измерения неизвестна даже приблизительно, и о ней известно лишь, что она лежит в пределах $(T_{макс} - T_{мин})$ рабочего интервала температур, то результирующая неопределенность измерения давления составляет

$$\Delta P_m = (P_2 - P_1) = |\gamma|^*(T_{макс} - T_{мин}) \quad (2)$$

вне зависимости от того, известен знак коэффициента наклона прямой $P(T)$ или нет.

Рассмотрим случай нелинейной температурной зависимости выходного сигнала тензорезисторного преобразователя (ТП). Например, для ТП давления на основе структур КНС, температурный дрейф которых компенсируется схемой с термнезависимыми резисторами, зависимость выходного сигнала от температуры близка к параболической [5]. Аналогичную зависимость имеют кремниевые ТП с диффузионными или имплантированными тензорезисторами. Соответственно измеряемое датчиком с таким ТП давление (пропорциональное выходному сигналу датчика) также нелинейно зависит от температуры (рис.2), если не принимать специальные меры для его дополнительной корректировки в электронной схеме, например, с помощью микропроцессора. В этом случае в соответствии с буквой нормативных документов [1,2], если нормировать температурную погрешность линейным коэффициентом, то необходимо указывать максимальное (по абсолютной величине) значение наклона $\pm\gamma_{макс}$ касательной к параболе (тонкие прямые на рис.2). В результате *нормативную* суммарную температурную погрешность в рабочем интервале температур $T_{макс} \dots T_{мин}$ следует определять по (2):

$$\Delta P_n = (P_2 - P_1) = |\gamma_{макс}|*(T_{макс} - T_{мин}). \quad (3)$$

Очевидно, что эта величина намного превосходит *фактическую* суммарную температурную погрешность (см. рис.2)

$$\Delta P_\phi = (P_n - P_{мин}). \quad (4)$$

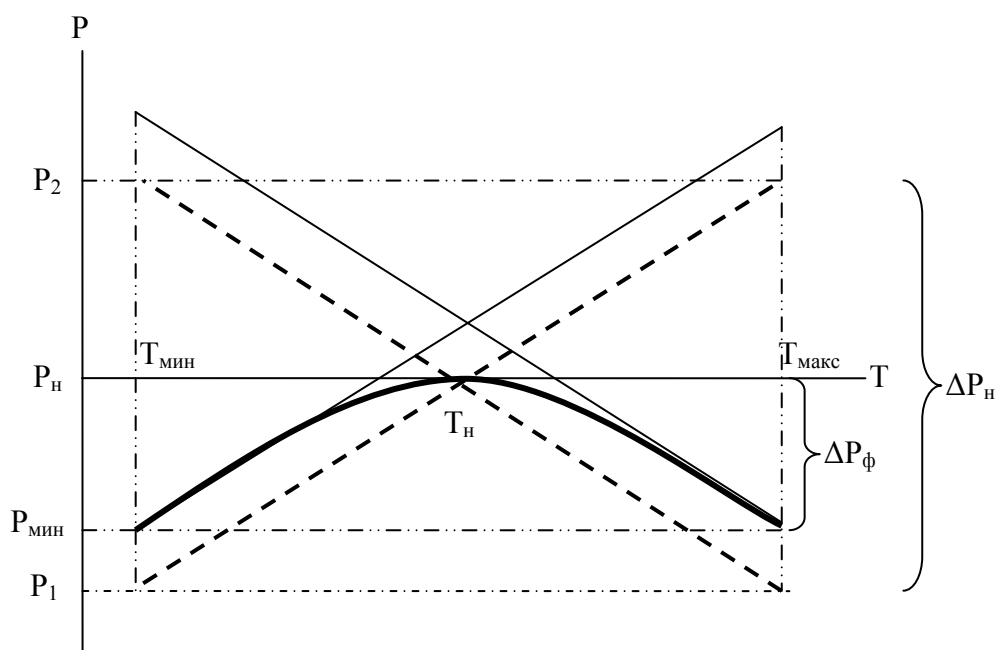


Рис.2. Определение зоны температурной погрешности измерения давления для датчика с нелинейной температурной зависимостью выходного сигнала: ΔP_{ϕ} – фактическая зона температурной погрешности; $\Delta P_{н}$ – нормативная зона температурной погрешности при нормировании температурной погрешности линейным коэффициентом температурной зависимости.

Отсюда следует, что при нелинейной температурной зависимости выходного сигнала датчика использовать для нормирования дополнительной температурной погрешности измерения линейный температурный коэффициент γ бессмысленно, поскольку в пределах рабочего интервала температур он изменяется по величине и по знаку (в том числе проходя через ноль), а по существующим правилам [1,2] в руководстве по эксплуатации необходимо указывать *максимальное* (по абсолютной величине) значение γ .

Именно по этой причине в датчиках давления МИДА-13П в качестве меры дополнительной температурной погрешности нормируется *зона температурной погрешности* в рабочем интервале температур ΔP_{ϕ} , которая и указывается в паспорте датчика. Статистические данные по величине зоны температурной погрешности датчиков МИДА-13П приведены в [6]. Надо сказать, что Госстандарт вполне согласен с таким подходом, и все нормативные документы датчиков МИДА признаны Госреестром РФ. Использование для нормирования дополнительной температурной погрешности измерений зоны температурной погрешности (наряду с линейным температурным коэффициентом) допускается и некоторыми зарубежными стандартами [7-9].

Необходимо сделать еще несколько замечаний. Во-первых, в датчиках с температурной зависимостью выходного сигнала близкой к параболической (а именно такова она в датчиках давления МИДА) зона температурной погрешности минимальна, когда «нормальная» температура $T_{н}$, при которой происходит калибровка датчика и определяется его основная погрешность, находится в середине рабочего интервала температур (в котором проводится температурная компенсация выходного сигнала). В датчиках МИДА-13П это выполняется автоматически (рабочий интервал температур от -40 до $+80$ °С, нормирование при 20 ± 5 °С – рис.3).

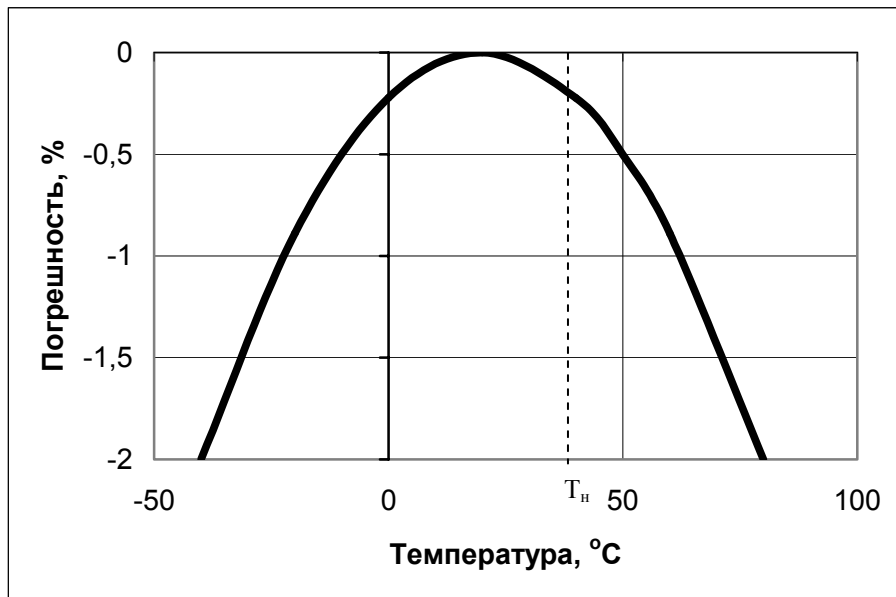


Рис.3. Типичная температурная зависимость дополнительной температурной погрешности измерения давления датчиком МИДА-13П, термокомпенсированным в 120-градусном интервале температур (-40...+80 °С). «Нормальная» температура $T_n = (20 \pm 5)$ °С. При термокомпенсации в другом интервале температур такой же ширины (например, 200...320 °С) температурная зависимость погрешности имеет аналогичный вид (но в этом случае для приведенного примера «нормальная» температура должна быть $T_n = (260 \pm 5)$ °С).

В высокотемпературных датчиках МИДА-12П, в которых температура измеряемой среды может достигать 350 °С, ситуация несколько сложнее и будет рассмотрена подробно ниже.

Во вторых, если в случае линейной температурной зависимости при сокращении рабочего интервала температур суммарная температурная погрешность уменьшается линейно, то при параболической зависимости это уменьшение квадратично – например, при симметричном сокращении рабочего интервала температур вдвое (например, от -40...+80 °С до -10...+50 °С) зона температурной погрешности уменьшается вчетверо. Это позволяет создавать высокоточные датчики давления, работающие в ограниченном интервале температур, без использования сложной электроники. Так, в диапазоне 0-40 °С типичная зона температурной погрешности датчиков давления МИДА-13П с резистивной схемой термокомпенсации не превышает 0,2% (рис.3).

В-третьих, если «нормальная» температура, при которой определяется основная погрешность датчика (обычно это комнатная температура), находится не в центре диапазона термокомпенсации, то игнорирование нелинейности температурной зависимости погрешности измерений может привести к неправильному представлению о величине дополнительной температурной погрешности. На рис.4 показан случай, когда температурная компенсация датчика давления проведена в диапазоне -40...+120 °С. Как видно из рисунка, если для определения дополнительной температурной погрешности проводятся стандартные измерения при комнатной температуре (~20 °С) и в крайних точках рабочего интервала температур, то линейный коэффициент температурной погрешности в области низких температур по абсолютной величине получается значительно больше, чем в области высоких температур (штрих-пунктирные прямые на рис.4), хотя реальная температурная зависимость погрешности симметрична относительно центра области термокомпенсации.

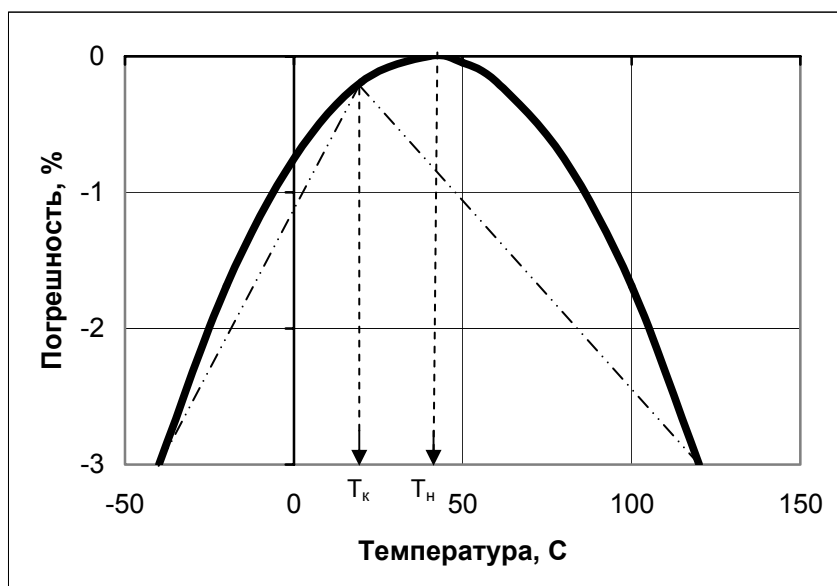


Рис.4. Если определение температурной погрешности датчика проводится по измерениям при температуре T_k , не совпадающей с серединой интервала термокомпенсации (T_n), и крайних температурах интервала, то, во-первых, возникает кажущаяся разница в температурных погрешностях с «минусовой» и с «плюсовой» сторон, а, во-вторых, занижается значение зоны температурной погрешности по сравнению с фактической.

Точно так же невозможно обеспечить одновременную минимизацию температурной погрешности измерения в двух температурных интервалах, если их центры не совпадают. Поскольку минимальная температурная погрешность достигается в центре интервала термокомпенсации, то в температурном интервале, смещенном от центра, температурная погрешность всегда будет больше, чем если бы термокомпенсация проводилась в этом температурном интервале (рис.5).

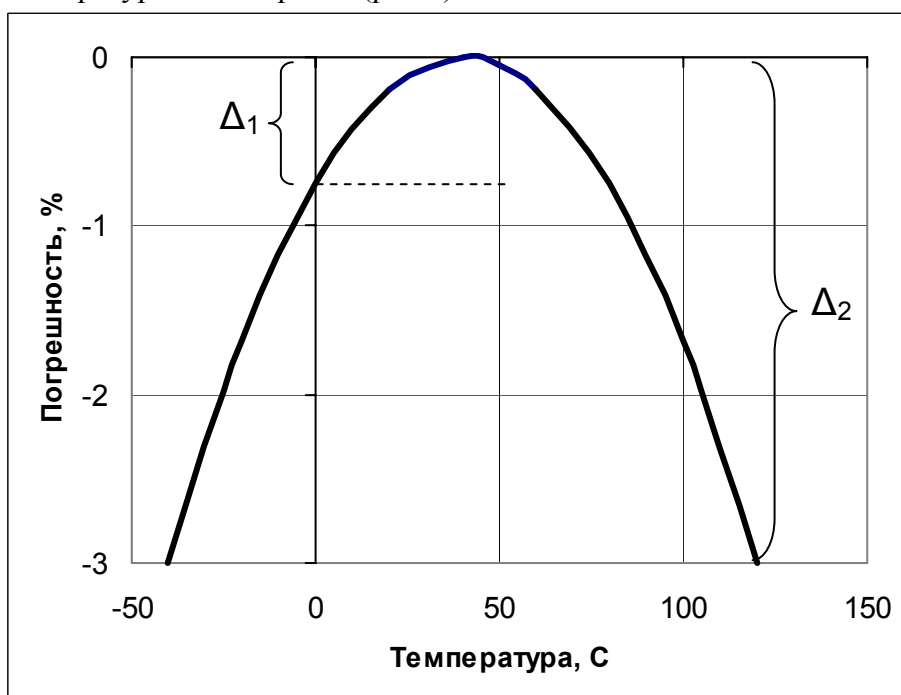


Рис.5а. Температурная зависимость погрешности измерения давления датчиком МИДА-13П, скомпенсированным в диапазоне температур $-40...+120$ °С. Зона температурной погрешности в интервале $0...+50$ °С составляет $\Delta_1 = 0,75\%$; зона температурной погрешности в интервале $-40...+120$ °С составляет $\Delta_2 = 3,00\%$.

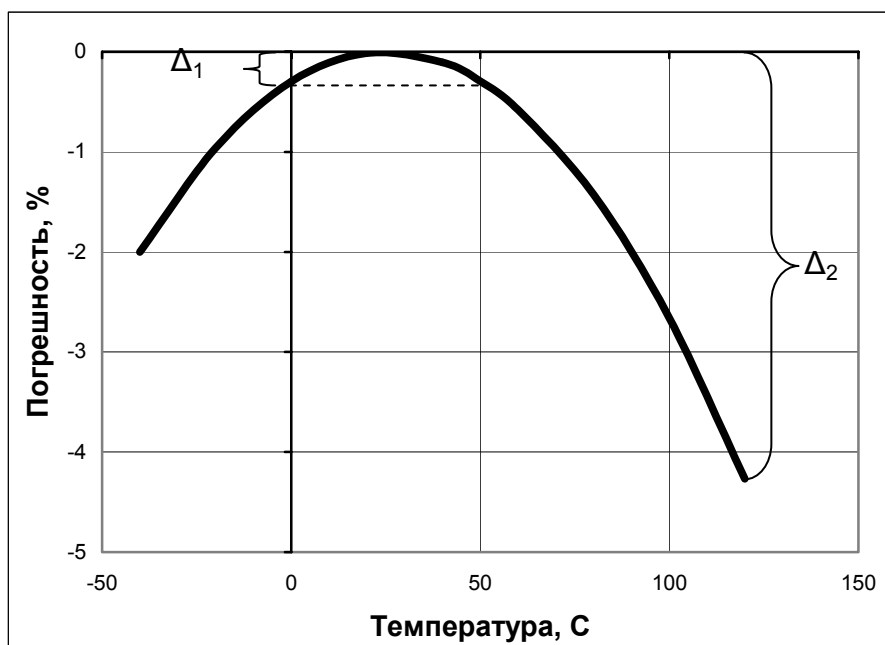


Рис.5б. Температурная погрешность для того же самого датчика, скомпенсированного в интервале температур $-40 \dots 90$ °С. В этом случае соответствующие зоны температурной погрешности равны $\Delta_1 = 0,30\%$ (уменьшение в 2,5 раза), $\Delta_2 = 4,27\%$ (увеличение менее, чем в 1,5 раза).

С учетом вышесказанного тем более неприемлемо нормирование температурной погрешности измерения линейным температурным коэффициентом для высокотемпературных датчиков давления (если только их реальная температурная зависимость выходного сигнала не описывается линейным законом). Более того, при термокомпенсации и нормировании дополнительной температурной погрешности высокотемпературных датчиков давления возникает еще одна проблема.

Как правило, высокотемпературные процессы, при которых необходимо измерять давление жидкой или газообразной среды, находящейся при высокой температуре (до 300-400 °С) проходят при фиксированной температуре $T_{пр}$, определяемой технологией процесса. Очевидно, что погрешность измерения давления была бы минимальна, если бы калибровка датчика (определение основной погрешности измерения) производилась при температуре $T_{пр}$, а температурная компенсация – в некотором диапазоне температур вокруг $T_{пр}$. Правда, при этом и периодическая поверка таких датчиков должна была бы проводиться при рабочей температуре $T_{пр}$, а это практически невозможно осуществить ни у потребителя, ни в лабораториях Госстандарта. Если же калибровать датчик при комнатной температуре, то при рабочей температуре погрешность измерения будет неоправданно велика.

Решение этой проблемы, предложенное Промышленной группой МИДА для датчиков давления высокотемпературных сред МИДА-12П и согласованное Госстандартом РФ, заключается в следующем (рис.6).

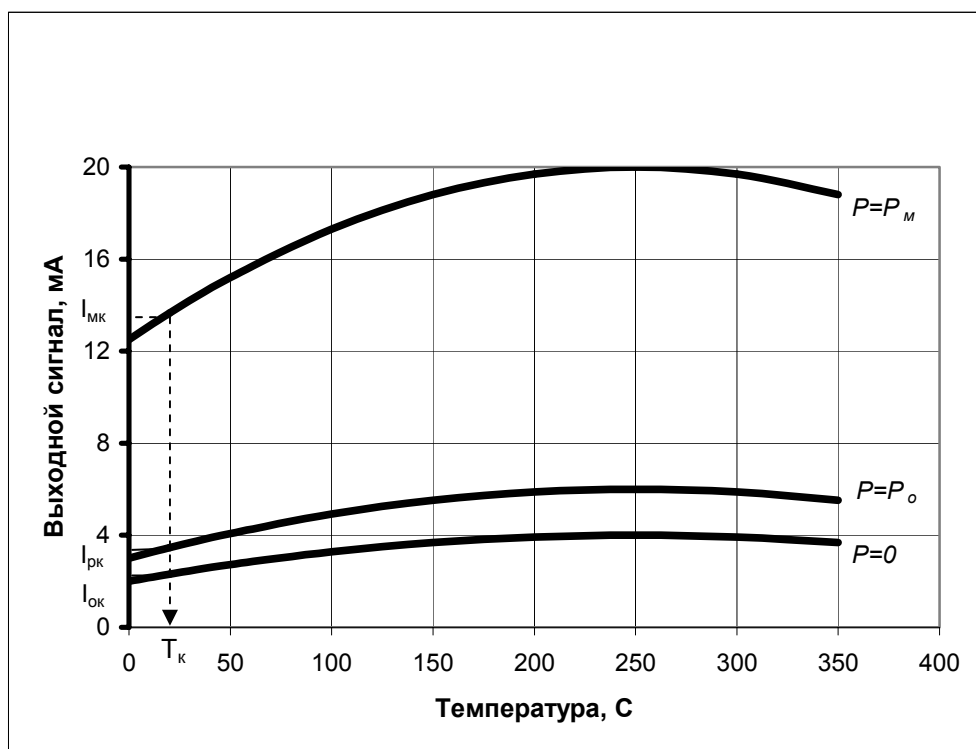


Рис.6. Типичная температурная зависимость выходного сигнала (диапазон изменения 4-20 мА) датчика давления высокотемпературных сред МИЛА-ДИ-12П, нормированного при «нормальной» температуре $T_n = 250$ °С, при разных измеряемых давлениях. Температурная компенсация проведена в рабочем интервале температур 200...300 °С; зона температурной погрешности измерения давления в этом интервале равна 2%; изменение начального выходного сигнала при понижении температуры от T_n до комнатной температуры T_k составляет более 30% (подробнее на рис. 7). Конкретные величины $I_{ок}$ и $I_{мк}$ (или P_o , $I_{рк}$ и $I_{мк}$) заносятся в паспорт датчика и используются при периодической проверке.

При выпуске из производства калибровка датчика (определение основной погрешности) производится при определенной «нормальной» температуре T_n , близкой к рабочей температуре $T_{пр}$ у заказчика (стандартные значения T_n : 50, 100, 150, 200, 250 и 300 °С), а компенсация температурной погрешности проводится в 100-градусном интервале вокруг T_n . В результате погрешность измерения давления при температуре T_n равна основной погрешности датчика (0,25, 0,5 или 1,0%), а во всем 100-градусном интервале температур вокруг T_n зона дополнительной температурной погрешности не превышает 2-4%, резко уменьшаясь с уменьшением рабочего интервала температур. При этом вне интервала термокомпенсации выходной сигнал датчика меняется достаточно сильно (примерно по параболическому закону для датчиков на основе КНС). Одновременно при комнатной температуре T_k определяются значения выходного сигнала датчика, соответствующие нулевому и максимальному давлениям. Эти значения $I_{ок}$ ($P=0$) и $I_{мк}$ ($P=P_{макс}$) заносятся в паспорт прибора и используются в дальнейшем при периодической проверке датчика. Если же температурная зависимость начального выходного сигнала датчика настолько велика, что при комнатной температуре выходной сигнал «уходит в отсечку» (рис.7),

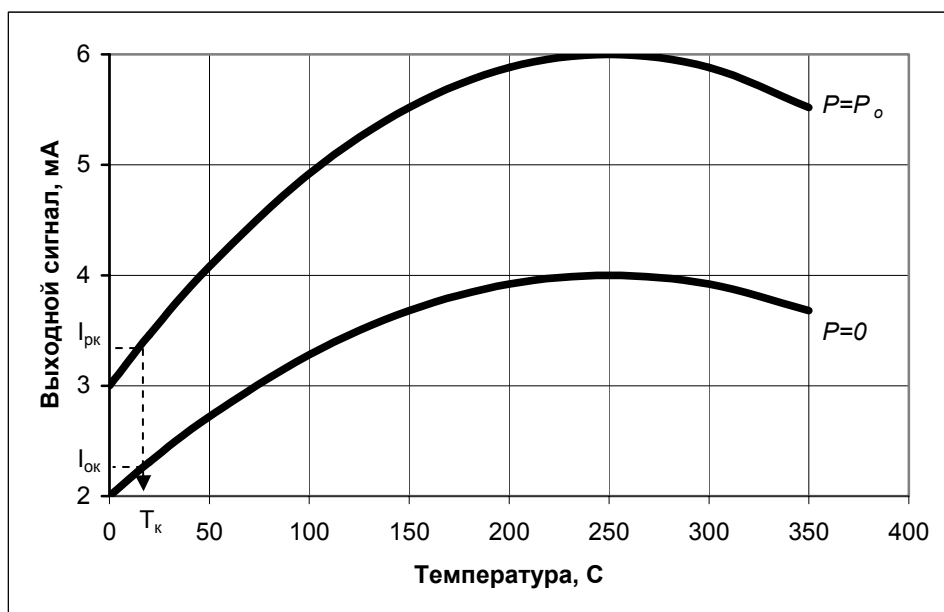


Рис.7. Выходной сигнал датчика высокотемпературных сред МИДА-ДИ-12П при нулевом давлении (рис.6) в увеличенном масштабе. Из-за сильной температурной зависимости начальный выходной сигнал $I_{к0}$ при комнатной температуре T_k находится «в отсечке»; для появления выходного сигнала $I_{рк}$, реагирующего на давление при комнатной температуре, необходимо подать давление P_0 . Конкретные величины P_0 и $I_{рк}$ заносятся в паспорт датчика и используются при периодической поверке.

то при комнатной температуре на датчик подается небольшое давление P_0 , достаточное для того, чтобы выходной сигнал уверенно вышел в зону работы электронного блока. В этом случае определяются значения давления $P=P_0$ и соответствующего ему выходного сигнала $I=I_{рк}$, которые и заносятся в паспорт прибора. Одновременно в паспорте указывается точное значение T_k .

При периодической поверке при комнатной температуре T_k (точность поддержания которой не должна быть хуже 1-2 °С) при необходимости с помощью регулировок «нуля» и «диапазона» устанавливаются паспортные значения $I_{ок}$ (или $I_{рк}$) и $I_{мк}$. Проверяется нелинейность и вариация датчика, и в случае их соответствия паспортным данным датчик можно использовать для измерения давления высокотемпературных сред с погрешностью, определяемой величиной основной погрешности (при близости значений T_n и $T_{пр}$) или не выходящей за ширину зоны температурной погрешности (при $T_{пр} \in [T_n - 50 \text{ °C}, T_n + 50 \text{ °C}]$). Это, среди прочего, гарантируется тем, что компенсация температурной погрешности в датчиках МИДА проводится с помощью термoneзависимых резисторов, находящихся в электронном блоке вдали от высокотемпературной измеряемой среды [5].

Наконец, следует отметить, что по желанию заказчика в паспорт прибора могут быть занесены конкретные значения выходного сигнала датчика при нулевом и максимальном давлениях, измеренные при «нормальной» температуре и в крайних точках диапазона термокомпенсации, что дает возможность потребителю (в случае известной температуры измеряемой среды) учесть дополнительную температурную погрешность измерения давления и таким образом существенно повысить точность измерения.

Таким образом, для тензорезисторных датчиков механических величин, работающих в широком интервале температур, нормирование дополнительной температурной погрешности с помощью линейного температурного коэффициента приводит к значительному искажению результатов измерения. Более правильным является нормирование зоны температурной погрешности в интервале температур, в котором

производится термокомпенсация датчиков. Это особенно важно для полупроводниковых тензорезисторных датчиков с нелинейной температурной зависимостью выходного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы оценки рабочих характеристик измерительных преобразователей, предназначенных для использования в системах управления промышленными процессами. /Стандарт МЭК, публикация 770.
2. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия. /ГОСТ 22520-85 (СТ СЭВ 4124-83).
3. Стучебников В.М. Тензорезисторные преобразователи на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире». Измерения, контроль, автоматизация /Н.-т сборник 1982, №4 (44), с.15-26
4. Бушев Е.Е., Николайчук О.Л., Стучебников В.М. Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА. Датчики и системы, 200, №1, с.21-27
5. Мартынов Д.Б., Стучебников В.М. Температурная коррекция тензопреобразователей давления на основе КНС. Датчики и системы. 2002, №10, с.6-12.
6. Бушев Е.Е., Николайчук О.Л., Стучебников В.М. Серия общепромышленных датчиков давления МИДА-13П. Датчики и системы. 2004, в печати.
7. Specifications and Test for Strain Gage Pressure Transducers. Standard ISA-S37/3-1975 (R 1982).
8. Process Instrumentation Terminology. Standard ISA-S51.1
9. Druckaufnehmer, Druckmessumformer, Druckmessgerate. Begriffe, Angaben in Datenblättern. DIN 16086.

АННОТАЦИЯ

Для тензорезисторных датчиков механических величин, работающих в широком интервале температур, нормирование дополнительной температурной погрешности с помощью линейного температурного коэффициента приводит к значительному искажению результатов измерения. Более правильным является нормирование зоны температурной погрешности в интервале температур, в котором производится термокомпенсация датчиков. Это особенно важно для полупроводниковых тензорезисторных датчиков с нелинейной температурной зависимостью выходного сигнала.

For piezoresistive mechanical sensors working in wide temperature range definition of additional temperature error with linear temperature coefficients may cause serious distortion of results of measurement. More adequate is definition of temperature error band within the operating temperature range, where the compensation of the additional temperature error is carried out. This is most important for semiconductor piezoresistive sensors with nonlinear temperature dependence of the output signal.