

ТЕМПЕРАТУРНАЯ КОРРЕКЦИЯ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КНС

Д.Б.Мартынов, В.М.Стучебников

Как и для других полупроводниковых тензопреобразователей (ТП), температурная зависимость выходного сигнала в ТП на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» (КНС) [1] является главным источником дополнительной погрешности преобразования. В датчиках давления МИДА [2] уменьшение температурной погрешности достигается отдельной коррекцией температурной зависимости выходного сигнала ТП и температурной зависимости параметров электронной схемы преобразования сигнала. Такой подход позволяет значительно уменьшить трудоемкость изготовления датчиков в серийном производстве, а также выпускать ТП давления как самостоятельные средства измерения, которые все более широко используются в системах измерений и контроля.

В настоящей работе рассматриваются различные методы коррекции температурной погрешности ТП давления на основе структур КНС, используемые при серийном производстве в Промышленной группе МИДА. При этом следует различать аддитивную и мультипликативную составляющие температурной погрешности, поскольку они имеют различное происхождение и вносят разный вклад в суммарную температурную погрешность.

Аддитивная составляющая (температурный дрейф начального сигнала), определяемая разностью температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) тензорезисторов в смежных плечах моста, в ТП на основе КНС в основном связана с температурными напряжениями сапфировой подложки, возникающими из-за разности коэффициентов температурного расширения сапфира и титана. Эта составляющая (по абсолютной величине) не зависит от выходного сигнала ТП, так что ее вклад тем больше, чем меньше чувствительность ТП к измеряемому давлению.

Мультипликативная составляющая (температурный дрейф чувствительности) связана с температурной зависимостью коэффициента тензочувствительности ТП и упругих параметров титана и сапфира; ее относительная величина не зависит от выходного сигнала ТП.

Для коррекции температурной погрешности ТП на основе КНС используются два метода – физико-технологический [3] и схемотехнический. Физико-технологический метод давно и успешно используется при питании тензомоста ТП постоянным током. Обычно такое питание ТП применяется в датчиках давления с унифицированным выходным сигналом, например, в сериях Сапфир-22, Метран и их модификациях; питание постоянным током использовалось и в датчиках МИДА-01П, выпускаемых ПГ МИДА [2]. Однако, самостоятельные ТП давления, как правило, питаются от источника напряжения. За рубежом такие ТП давно и широко используются в системах контроля и управления, а в последнее время такие ТП используются и отечественными потребителями. В этом случае для эффективной коррекции температурной погрешности выходного сигнала приходится использовать дополнительно схемотехнический метод. Питание ТП постоянным

напряжением используется также в датчиках давления МИДА-12П и МИДА-13П. Схемотехническая коррекция осуществляется с помощью постоянных резисторов, не зависящих от температуры. Это позволяет устанавливать эти резисторы в любом месте датчика (как правило, на печатной плате электронного преобразователя сигнала), не заботясь о равенстве температур ТП и корректирующих элементов.

Поскольку методы температурной коррекции ТП при питании от источника тока и от источника напряжения существенно различаются, то целесообразно рассмотреть их отдельно и сравнить эффективность этих методов.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ КОРРЕКЦИЯ ТП ПРИ ПИТАНИИ ТОКОМ

Возможности *физико-технологического* метода коррекции *аддитивной составляющей* температурной погрешности ТП при питании от источника тока связаны с особенностями топологии тензосхемы, в которой кроме тензорезисторов включены элементы балансировки замкнутого тензомоста, позволяющие разрывом перемычек изменять начальный выходной сигнал моста практически без изменения ТКС его плеч [4]. В этом случае можно установить такой начальный выходной сигнал ТП, что его величина не будет зависеть от температуры [5]. Величина этого сигнала U_{oonm} определяется следующим образом. При питании ТП постоянным напряжением измеряются значения начального выходного сигнала U_0 при двух температурах: $U_0(T_1)$ и $U_0(T_2)$; одновременно измеряются значения сопротивления диагонали питания тензомоста $R_M(T_1)$ и $R_M(T_2)$. Величина оптимального начального сигнала (при питании напряжением) определяется как

$$U_{oonm} = \frac{U_0(T_2) - U_0(T_1)}{\ln [R_M(T_1)/R_M(T_2)]} . \quad (1)$$

Если с помощью элементов балансировки и при питании постоянным напряжением установить такую величину начального сигнала тензомоста, то при питании постоянным током начальный сигнал ТП практически не будет зависеть от температуры. Конечно, при этом тензомост будет разбалансирован, но начальный разбаланс можно легко убрать при преобразовании электронной схемой в датчике.

Этот метод коррекции аддитивной составляющей температурной зависимости ТП успешно использовался в датчиках МИДА-01П. Типичный результат коррекции показан на рис.1; видно, что аддитивная составляющая температурной погрешности уменьшается в десятки раз. Вместе с тем, результирующая температурная зависимость начального сигнала близка к параболической. Поэтому для ее описания нельзя использовать стандартную нормировку дополнительной температурной погрешности в $\%/10^\circ\text{C}$ [6]; вместо этого имеет смысл говорить о максимальной зоне аддитивной температурной погрешности $\Delta_{то}$, подразумевая под ней максимальное изменение выходного сигнала в температурном диапазоне компенсации (Рис.1). Такое нормирование дополнительной температурной погрешности вообще более правильно описывает свойства полупроводниковых ТП, у которых линейные температурные зависимости параметров скорее исключение, чем правило.

Типичные результаты коррекции аддитивной температурной погрешности при серийном производстве датчиков давления МИДА-01П, в которых питание ТП осуществляется постоянным током, показаны на рис.2. Как видно, в среднем аддитивная температурная

погрешность датчиков уменьшается почти в 20 раз по сравнению с исходной аддитивной температурной погрешностью ТП (при этом следует учитывать, что в данные рис.2б дает неучитываемый вклад аддитивная погрешность электронной схемы датчика).

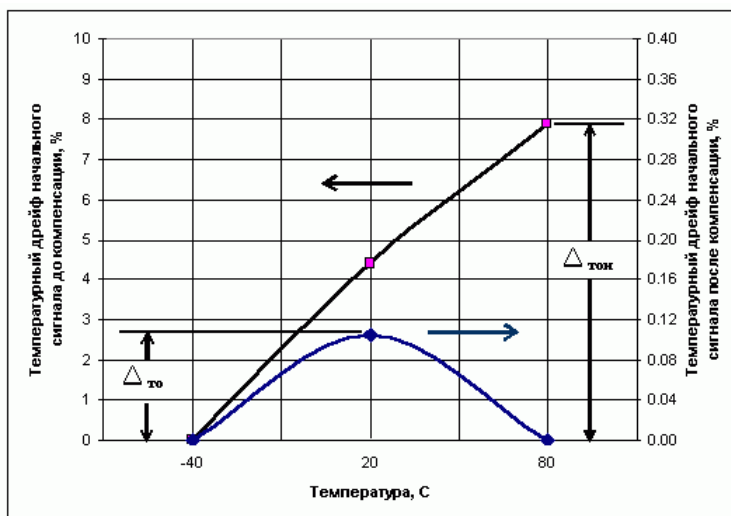
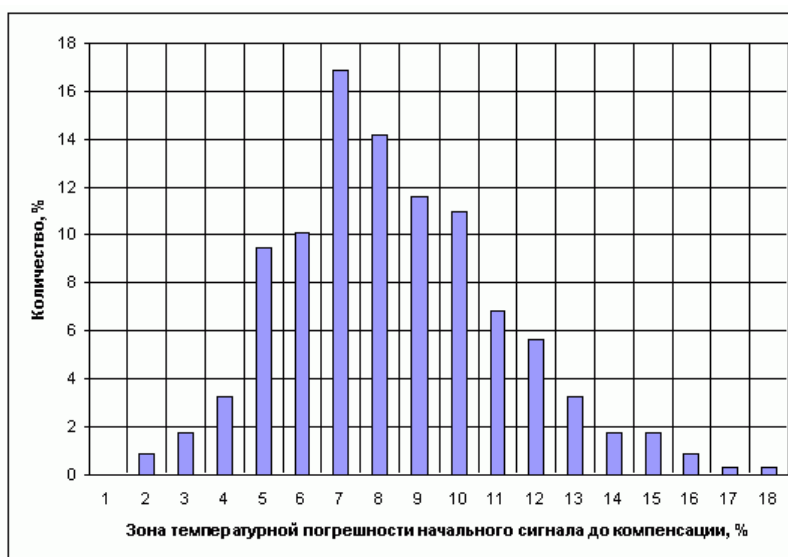
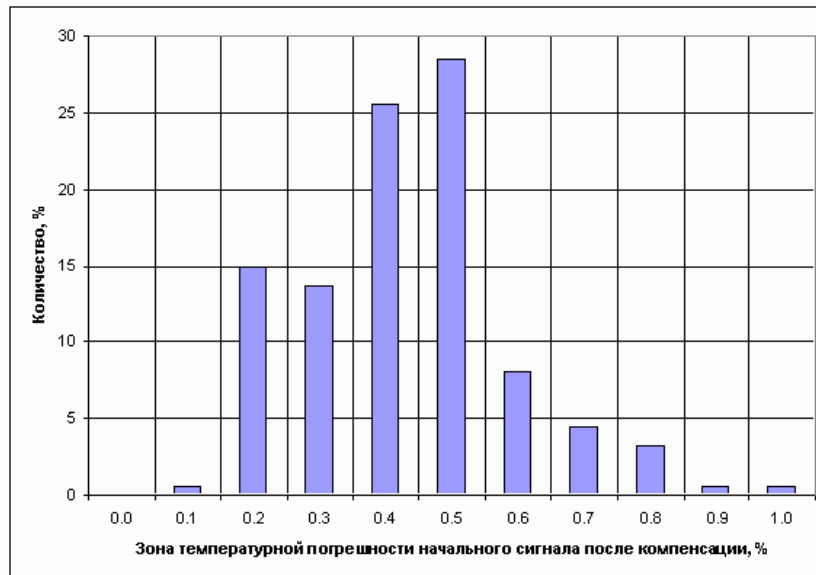


Рис. 1. Температурный дрейф начального выходного сигнала до и после термокомпенсации для ТП давления при питании током (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала). $\Delta_{\text{мон}}$ – зона температурной погрешности нуля ТП до компенсации, $\Delta_{\text{то}}$ – то же после термокомпенсации.



а)



б)

Рис.2. Зона температурной погрешности начального сигнала ТП давления при питании постоянным током в диапазоне температур – 40...+ 80 °С (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала ТП). Диапазон измерения 14 МПа, объем выборки 857 шт.

а) Исходное распределение; средняя величина $\Delta_{мон} = 7.9 \%$.

б) Распределение после компенсации (в датчике); средняя величина $\Delta_{мо} = 0.4 \%$.

Возможность физико-технологической коррекции мультипликативной составляющей температурной погрешности ТП определяется наличием в структурах КНС явления дифференциальной температурной инвариантности пьезосопротивления [7]. Это явление заключается в том, что при определенной величине удельного сопротивления $\rho_{онт}$ слоя кремния на сапфире в определенном интервале температур (примерно от –100 до + 200 °С) температурные коэффициенты сопротивления и эластосопротивления совпадают по величине, будучи противоположными по знаку. Это приводит к тому, что в этом интервале температур чувствительность ТП с оптимальным удельным сопротивлением структуры КНС при питании током будет практически постоянна [7].

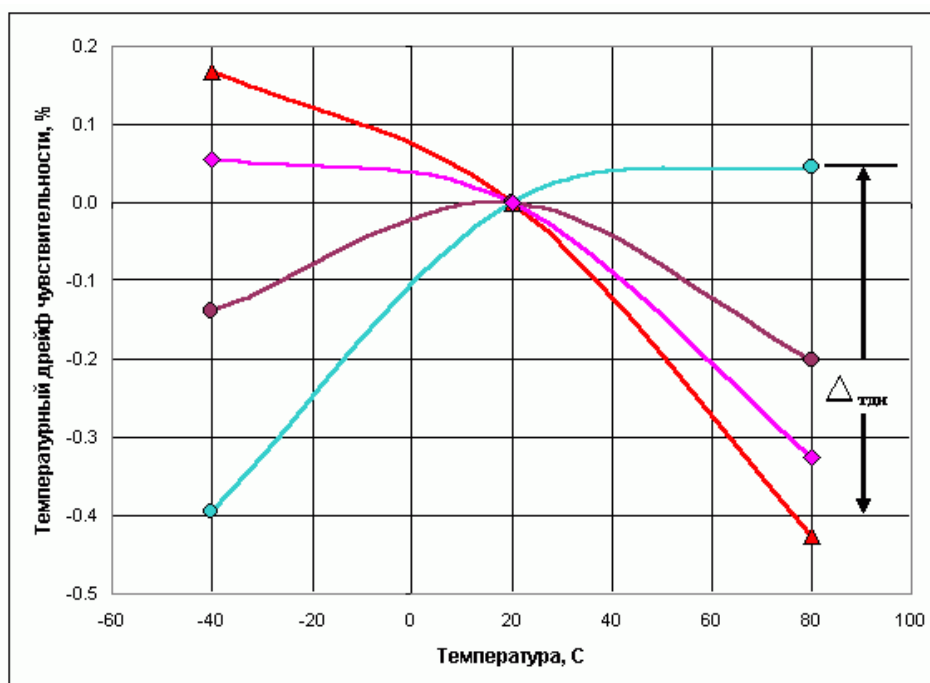
Строго говоря, величина оптимального удельного сопротивления несколько меняется в зависимости от конструкции ТП. Кроме того, для достижения приемлемой коррекции величина $\rho_{онт}$ должна выдерживаться с высокой точностью (не хуже 1-2%), тогда как практически структуры КНС изготавливаются с разбросом удельного сопротивления 6-10 %. Поэтому на практике требуется дополнительное использование схемотехнической компенсации мультипликативной составляющей температурной погрешности ТП, когда параллельно питающей диагонали тензомоста включают термнезависимый резистор R_0 (Рис. 3б). Величина R_0 рассчитывается по формуле [8]:

$$R_0 = R_M(T_1) \frac{\frac{R_M(T_2)}{R_M(T_1)} - \frac{U_d(T_2)}{U_d(T_1)}}{\frac{U_d(T_2)}{U_d(T_1)} - 1}, \quad (2)$$

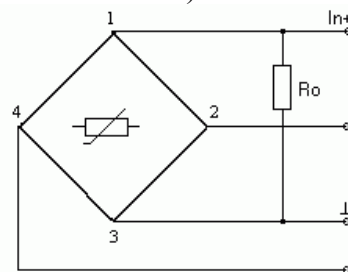
где T_1 и T_2 – границы интервала температурной компенсации, R_M – сопротивление питающей диагонали моста, U_d – диапазон изменения выходного сигнала ТП при подаче

номинального давления. Как уже говорилось, использование термнезависимого компенсирующего резистора R_0 позволяет устанавливать его на плате электронного преобразователя датчика, не заботясь о равенстве температур чувствительного элемента и резистора.

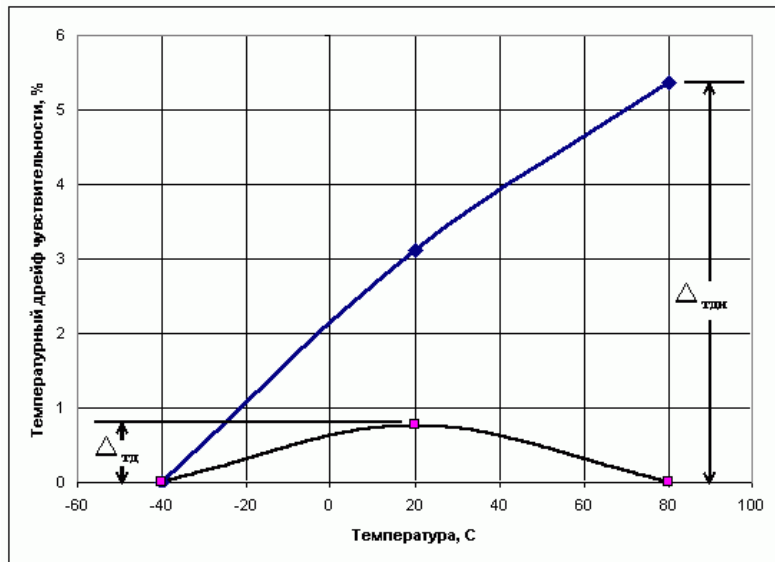
Результат использования указанного способа коррекции мультипликативной составляющей температурной погрешности ТП при серийном производстве датчиков давления МИДА-01П показан на рис.3. Как видно, температурный дрейф чувствительности датчиков в режиме самокомпенсации ТП (когда удельное сопротивление кремния оказывается близким к оптимальному) может быть достаточно мал (рис.3а). Отметим, что согласно [6] зона дополнительной температурной погрешности датчика с основной погрешностью 0,1% в диапазоне температур $-40\dots+80\text{ }^\circ\text{C}$ не должна превышать $0,1 * 12 = 1,2\%$. Дополнительное использование схмотехнического метода при отклонении удельного сопротивления кремния от оптимального снижает температурную погрешность чувствительности ТП в диапазоне температур $-40\dots+80\text{ }^\circ\text{C}$ примерно до величины, достигаемой при самокомпенсации (рис.3в).



а)



б)



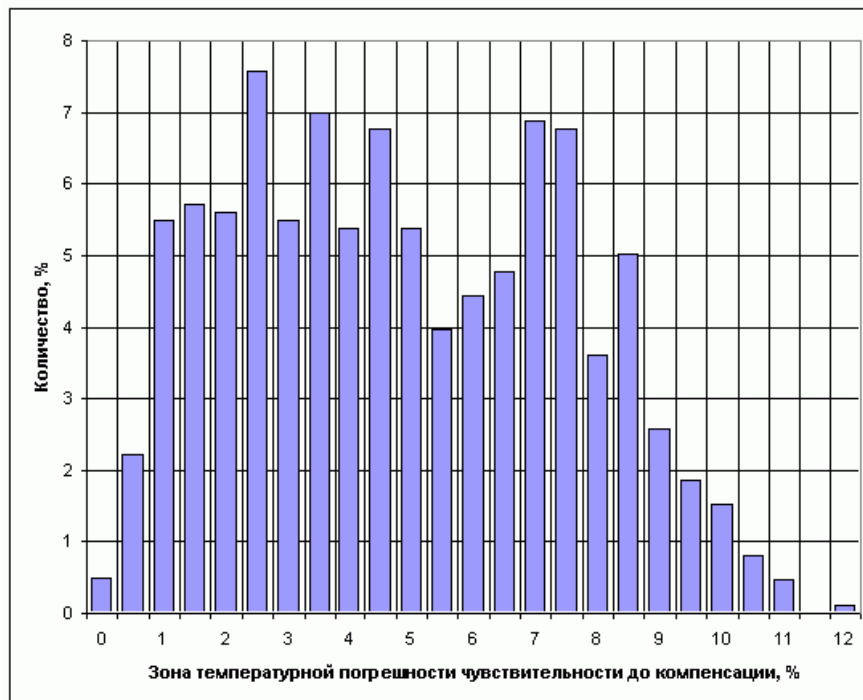
в)

Рис. 3. а) Температурный дрейф чувствительности ТП давления при питании постоянным током в режиме самокомпенсации в диапазоне температур $-40...+80^{\circ}\text{C}$.

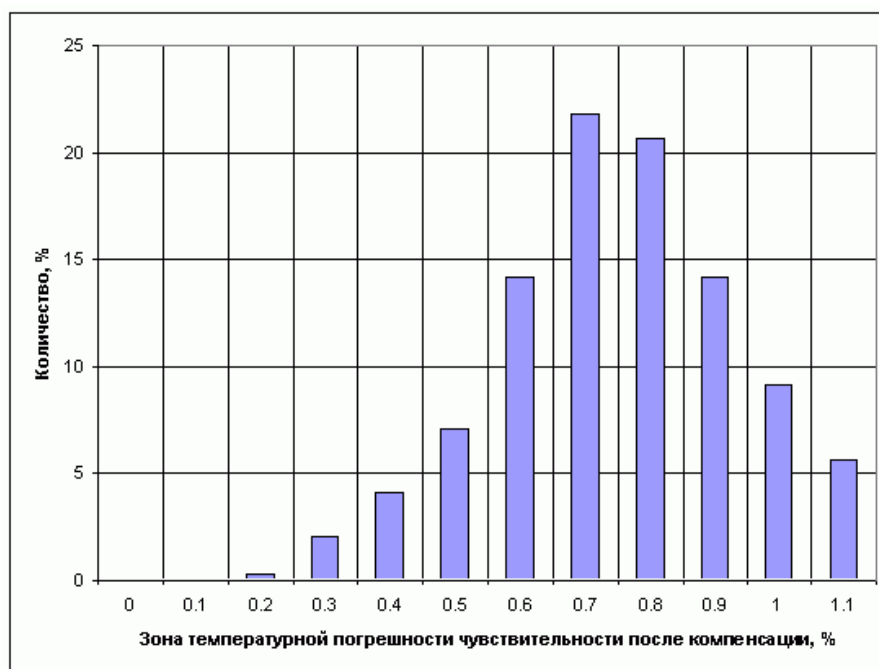
б) Схема включения резистора для компенсации температурного дрейфа чувствительности при питании током.

в) Температурный дрейф чувствительности ТП давления до и после термокомпенсации при питании постоянным током в диапазоне температур $-40...+80^{\circ}\text{C}$. $\Delta_{\text{тдн}}$ – зона температурной погрешности чувствительности ТП до компенсации, $\Delta_{\text{тдо}}$ – то же после термокомпенсации

Типичные результаты коррекции мультипликативной температурной погрешности при серийном производстве датчиков давления МИДА-01П показаны на рис.4. Как видно, в среднем мультипликативная температурная погрешность датчиков уменьшается почти в 5 раз по сравнению с исходной погрешностью ТП (в этих данных также присутствует неучитываемый вклад температурной погрешности электронной схемы датчика).



а)



б)

Рис. 4. Зона температурной погрешности чувствительности ТП давления при питании постоянным током в диапазоне температур $-40 \dots +80$ °С. Диапазон измерения 14 МПа, объем выборки 857 шт.

а) Исходное распределение; среднее значение $\Delta_{\text{мдн}} = 3.9$ %.

б) Распределение после компенсации; среднее значение $\Delta_{\text{мд}} = 0.76$ %.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ КОРРЕКЦИЯ ТП ПРИ ПИТАНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ

Как уже говорилось выше, питание ТП постоянным напряжением позволяет, во-первых, использовать их как самостоятельные элементы в системах контроля и управления, а, во-вторых, упростить электронную схему преобразования сигнала в датчике. К сожалению, в этом случае невозможно полностью исключить температурную погрешность преобразования ТП физико-технологическими методами, т.е. изменением характеристик слоя кремния или параметров тензомоста. Вместе с тем, повышение уровня легирования кремния позволяет снизить температурную зависимость как начального выходного сигнала ТП, так и его чувствительности; однако, при этом снижается и чувствительность ТП к измеряемому давлению, так что и в этом случае существует некоторый оптимальный уровень легирования слоя кремния, при котором отношение «выходной сигнал»/«температурная погрешность» имеет максимальное значение.

Для дополнительного снижения температурной погрешности ТП в этом случае приходится использовать *схмотехнические* методы.

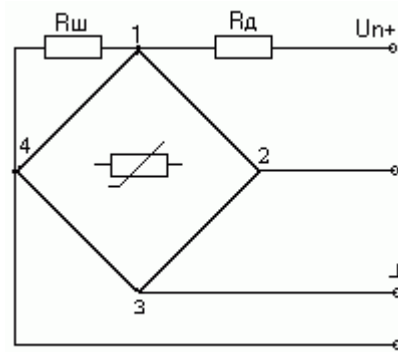
Коррекция *аддитивной составляющей* температурной погрешности наиболее просто осуществляется включением постоянного резистора параллельно одному из плеч тензомоста с наибольшим значением температурного коэффициента сопротивления (Рис.5а). Величина резистора $R_{\text{ш}}$ выбирается из условия равенства начального выходного сигнала ТП при двух температурах T_1 и T_2 , соответствующих границам температурного диапазона компенсации:

$$\frac{R_{ш}*(R_1^2(T_1) - R_2^2(T_1)) - R_1(T_1) * R_2^2(T_1)}{(R_1(T_1)*R_2(T_1) + R_{ш}*(R_1(T_1) + R_2(T_1))) * (R_1(T_1) + R_2(T_1))} =$$

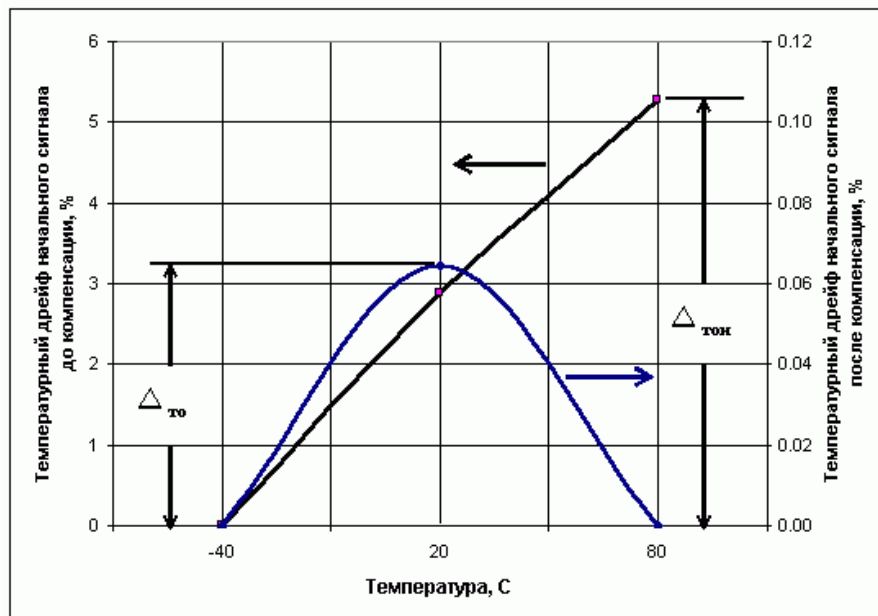
$$\frac{R_{ш}*(R_1^2(T_2) - R_2^2(T_2)) - R_1(T_2) * R_2^2(T_2)}{(R_1(T_2)*R_2(T_2) + R_{ш}*(R_1(T_2) + R_2(T_2))) * (R_1(T_2) + R_2(T_2))},$$

где R_1 и R_2 – значения тензорезисторов в смежных плечах тензомоста.

Типичный результат такой схмотехнической компенсации аддитивной температурной погрешности показан на рис.5б. Как видно, даже столь простая схема обеспечивает уменьшение зоны температурной погрешности начального выходного сигнала ТП в десятки раз. Статистика показывает, что при серийном производстве среднее значение максимальной зоны аддитивной температурной погрешности для ТП, питаемых напряжением, оказывается не хуже, чем при физико-технологической компенсации ТП, питаемых током (рис.6).

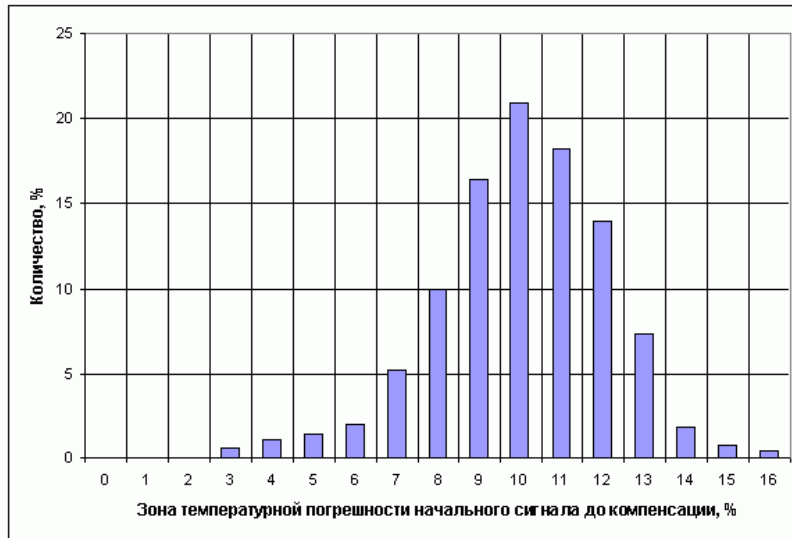


а)

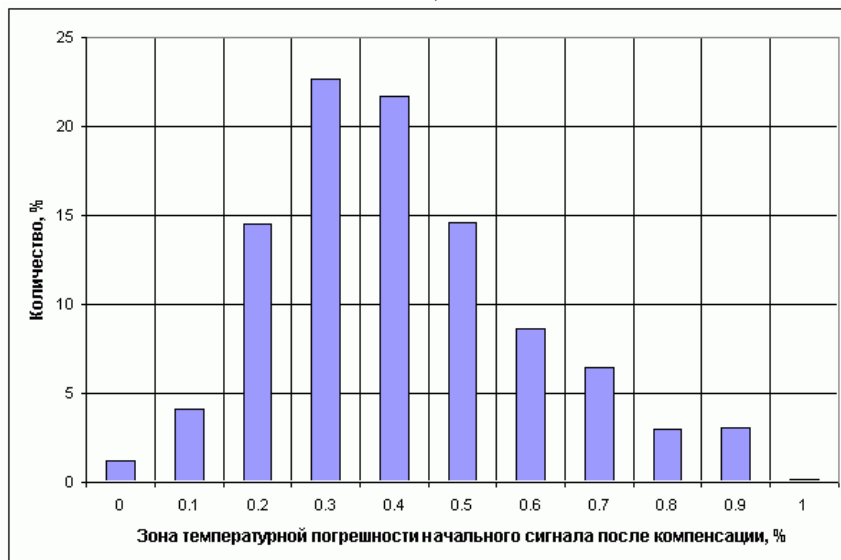


б)

Рис. 5. а) Схема включения резисторов для термокомпенсации ТП при питании постоянным напряжением. б) Температурный дрейф начального сигнала (в процентах от диапазона выходного сигнала) до и после термокомпенсации для ТП давления при питании напряжением.



а)



б)

Рис.6. Зона температурной погрешности начального сигнала ТП давления при питании постоянным напряжением в диапазоне температур $-40...+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала ТП). Диапазон измерения 20 МПа, объем выборки 1411 шт.

а) Исходное распределение; средняя величина $\Delta_{\text{мон}} = 9.7\%$.

б) Распределение после компенсации; средняя величина $\Delta_{\text{мо}} = 0.4\%$.

Для коррекции мультипликативной составляющей температурной погрешности в питающую диагональ тензомоста последовательно включается постоянный резистор R_d (Рис.5а), номинал которого рассчитывается по формуле

$$R_d = \frac{R_M(T_1) * R_M(T_2) * (U_d(T_2) - U_d(T_1))}{R_M(T_1) * U_d(T_1) - R_M(T_2) * U_d(T_2)} \quad (4)$$

Типичный результат описанной схмотехнической компенсации мультипликативной температурной погрешности ТП показан на рис.7. Видно, что зона температурной погрешности чувствительности ТП уменьшается в несколько раз. Отметим, что в отличие от случая питания постоянным током (рис.3), при питании постоянным напряжением чувствительность ТП убывает с ростом температуры.

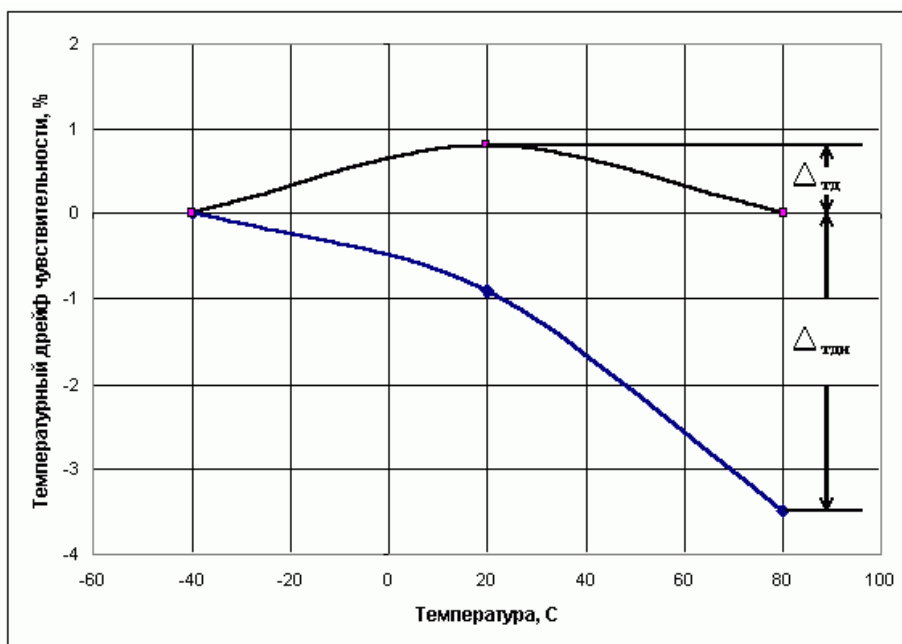
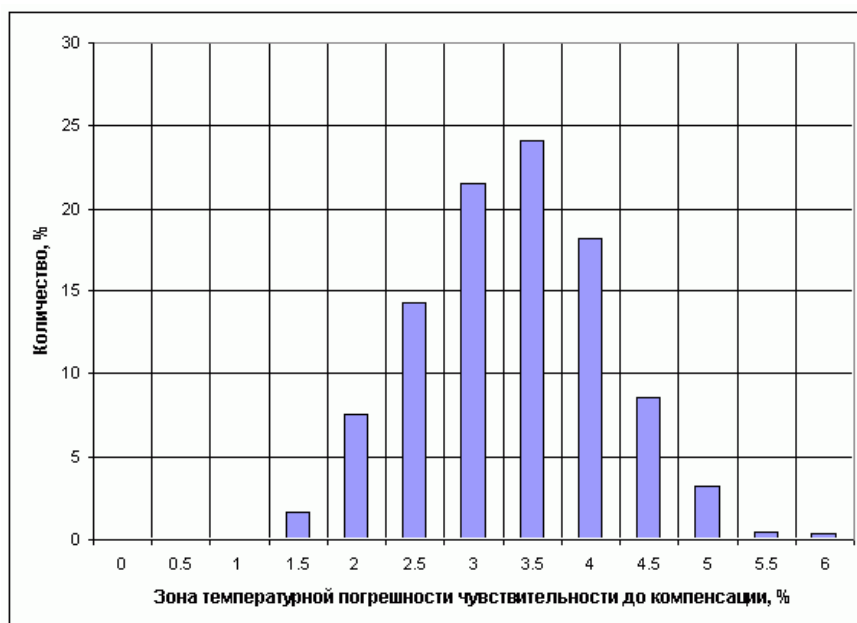
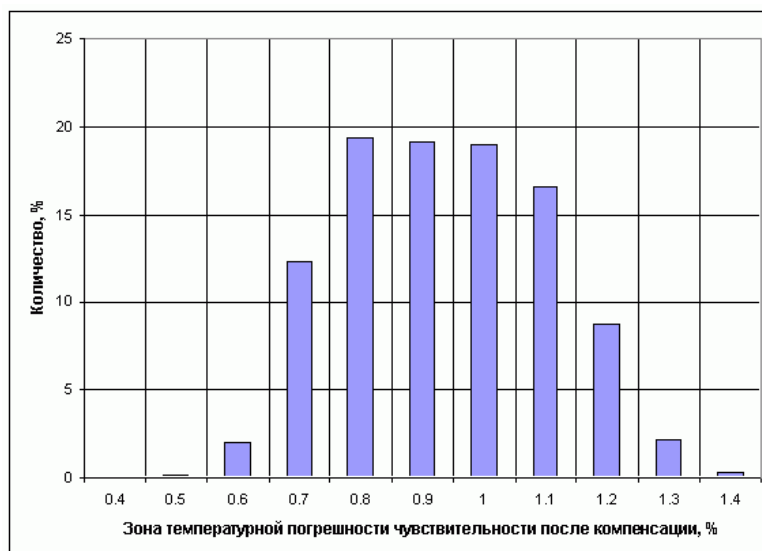


Рис. 7. Температурный дрейф чувствительности ТП давления до и после термокомпенсации при питании постоянным напряжением в диапазоне температур $-40 \dots +80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Статистическое распределение зоны температурной погрешности чувствительности ТП давления МИДА-ДИ-61П при питании постоянным напряжением в диапазоне температур $-40 \dots +80 \text{ }^\circ\text{C}$ показано на рис.8. Как видно из рисунка, результирующая температурная погрешность чувствительности ТП при питании напряжением несколько больше, чем при питании током и почти вдвое больше, чем достигаемая только за счет самокомпенсации чувствительности (рис.3а).



а)



б)

Рис.8. Зона температурной погрешности чувствительности ТП давления МИДА–ДИ–61П при питании постоянным напряжением в диапазоне температур - 40 ... +80 °С (в процентах от диапазона изменения выходного сигнала ТП). Диапазон измерения 20 МПа, объем выборки 1411 шт.

а) Исходное распределение; средняя величина $\Delta_{\text{мдн}} = 3.1 \%$.

б) Распределение после компенсации; средняя величина $\Delta_{\text{мд}} = 0.98 \%$.

Как уже отмечалось, температурная зависимость выходного сигнала ТП после термокомпенсации сильно нелинейна. На рис.9 показаны экспериментальные температурные зависимости начального сигнала и чувствительности ТП МИДА-ДИ-61П, снятые подробно в диапазоне температур $-40...+80$ °С. Как следует из рисунка, обе зависимости весьма близки к параболическим, что подтверждает обоснованность принятой в ТП МИДА методике коррекции и проверки эффективности термокомпенсации по трем температурным точкам – на краю и в центре температурного диапазона компенсации.

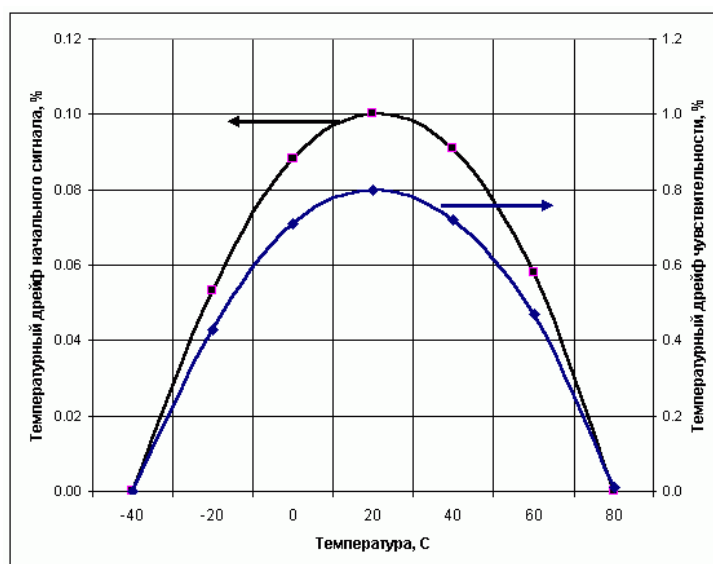


Рис. 9. Температурные зависимости начального сигнала и чувствительности ТП давления МИДА-ДИ-61П при питании напряжением после компенсации. Линии – расчетные параболы.

В заключение на рис.10 приведены статистические данные по максимальной зоне дополнительной температурной погрешности (в соответствии с [6]) датчиков давления МИДА-ДИ-01П и МИДА-ДИ-13П, в которых питание ТП осуществляется соответственно

от источника тока и источника напряжения. Из этих данных следует, во-первых, что средние величины зоны дополнительной температурной погрешности у датчиков обоих типов близки (1,3-1,4%), и даже питание ТП постоянным напряжением является предпочтительным, особенно если учесть, что при этом в электронной схеме датчика исключается каскад источника тока. Во-вторых, если учесть, что, согласно [6], для датчиков класса 0,1% зона дополнительной температурной погрешности не должна превышать 1,2% (в диапазоне температур $-40...+80$ °С) и соответственно для класса 0,2 – 2,4%, для класса 0,25 – 3,0%, то по дополнительной температурной погрешности практически все датчики МИДА-ДИ-13П удовлетворяют классу 0,25% и около 40% – классу 0,1%.

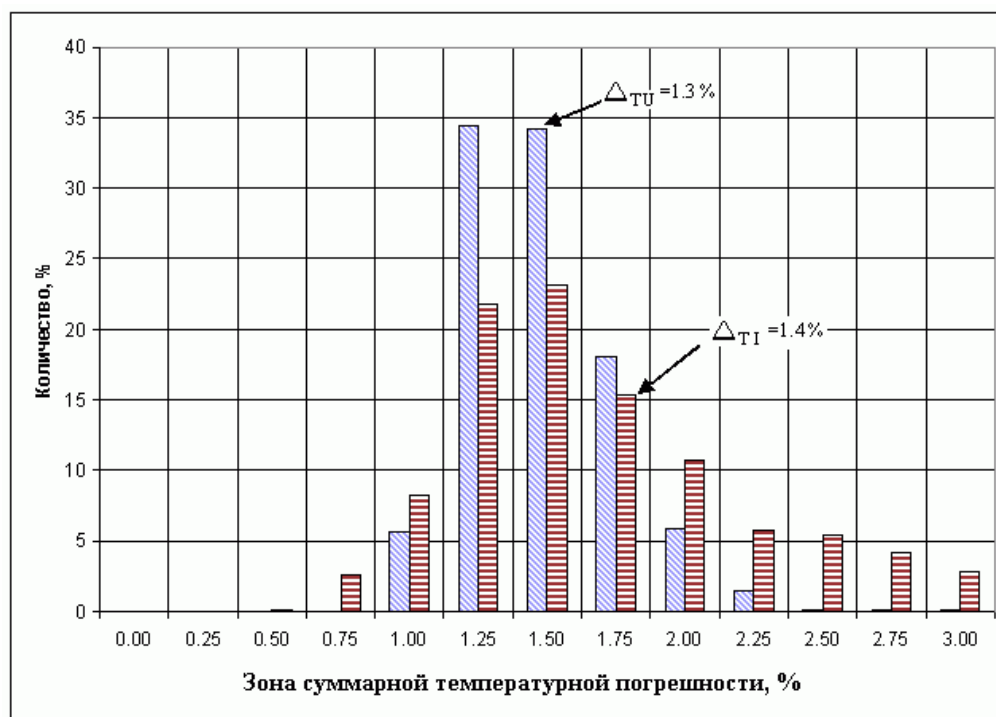


Рис. 10. Зона суммарной температурной погрешности датчиков МИДА – ДИ – 01П и МИДА – ДИ – 13П в диапазоне температур - 40... +80 С.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Стучебников В.М.* Тензорезисторные преобразователи на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире». // Измерения, контроль, автоматизация // Н.-т. сборник, 1983, № 1(45), с.30-42.
2. *Бушев В.В., Николайчук О.Л., Стучебников В.М.* Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА. // Датчики и системы, 2000, № 1, с. 21-27.
3. *Стучебников В.М.* Физико-технологические методы оптимизации метрологических характеристик полупроводниковых тензопреобразователей. // Датчики систем измерения, контроля и управления // Межвуз. Сборник научных трудов. Вып. 5. Пенза: ППИ, 1985, с. 15-25.
4. *Белоглазов А.В., Стучебников В.М. и др.* Полупроводниковые преобразователи силы и давления на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире». // Приборы и системы управления, 1982, № 5, с.21,22,27.
5. *Лурье Г.И., Стучебников В.М. и др.* Способ настройки интегральных тензомостов с питанием от источника стабилизированного тока. // АС СССР № 1411571, 1988.
6. Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми сигналами ГСП. Общие технические условия.// ГОСТ 22520-85.
7. *Stuchechnikov V.M.* SOS strain gauge sensors for force and pressure transducers. // Sensors and Actuators, 1991, v. 28, No 3, p.207-213.
8. *Лурье Г.И., Стучебников В.М. и др.* Способ настройки интегрального тензомоста с питанием от источника тока. // АС СССР № 1486767, 1989.