

Х Международная  
научно-практическая  
конференция



Димитровград-2008

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР КНС.

А.И. Козлов, Д.Б. Мартынов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников

Проблема повышения точности измерительных преобразователей физических величин постоянно сопутствует развитию науки, промышленности, транспорта и других отраслей экономики. В последнее время требования к точности преобразователей давления особенно возросли в связи с обвальным ростом цен на энергоносители и соответственной необходимостью увеличения точности систем учета расхода энергоносителей, важным элементом которых являются преобразователи давления. С другой стороны, рост количества используемых датчиков давления приводит к необходимости разработки и выпуска компактных средств поверки (калибраторов) таких датчиков в полевых или, по крайней мере, в производственных условиях. При этом точность калибраторов должна не менее чем втрое превышать точность поверяемых датчиков. Все это обуславливает повышенное внимание к точности преобразователей давления со стороны как потребителей, так и производителей датчиков.

Промышленная группа «Микроэлектронные датчики (ПГ МИДА) специализируется на разработке и производстве преобразователей и датчиков давления на основе структур «Кремний на сапфире» (КНС) [1]. За 17 лет своей деятельности она прошла путь от датчиков давления МИДА-01П класса 1,0 и 0,5 [2] до датчиков МИДА-13П класса 0,15-0,5 [3] и преобразователей давления с точностью 0,05-0,1% и в настоящее время работает над преобразователями с точностью 0,01%.

Прежде чем переходить к методам повышения точности преобразователей, следует уточнить некоторые термины и определения. Для датчиков давления, имеющих стандартный выходной сигнал (например, 4-20 мА), российские стандарты [4] регламентируют **основную погрешность**, которая определяется как максимальное отклонение действительного выходного сигнала датчика от стандартного, отнесенное к диапазону изменения выходного сигнала. Нетрудно видеть, что основная погрешность включает в себя, кроме нелинейности и вариации выходного сигнала, также точность установки начального («нуля») и максимального выходного сигналов датчика (рис. 1а), что определяется используемой электроникой и квалификацией пользователя. Кроме того, основная погрешность жестко связывается с **дополнительной температурной погрешностью**, что в сумме определяет **класс** датчика. При этом стандарт описывает температурную зависимость выходного сигнала **линейной функцией**, что практически не реализуется в микроэлектронных датчиках [5]. Ясно также, что понятие основной погрешности неприменимо к преобразователям давления без электронной схемы, не имеющим стандартного выходного сигнала, поскольку стандартизация сигнала осуществляется электроникой датчика.

По-другому определяется **точность** датчиков (и преобразователей) давления за рубежом. Как правило, точность определяется как среднеквадратичная сумма **нелинейности, вариации (гистерезиса) и повторяемости** выходного сигнала прибора. При этом нелинейность определяется как максимальное по модулю отклонение зависимости действительного выходного сигнала  $U$  от давления  $P$  от линейной:  $U(P) = U_0 + A \cdot P$ , отнесенное к диапазону изменения выходного сигнала  $U_d = U(P_{\max}) - U(P_{\min})$ . Вариация (гистерезис) определяется как максимальная разница между выходными сигналами при прямом и обратном ходе, отнесенная к  $U_d$  (рис. 1б). Повторяемость определяется как максимальная разность между выходными сигналами при последовательных (обычно двух) циклах нагружения прибора давлением, отнесенная к  $U_d$ .

Дополнительная температурная погрешность нормируется отдельно, причем ни величина, ни вид температурной зависимости не связываются с точностью прибора.

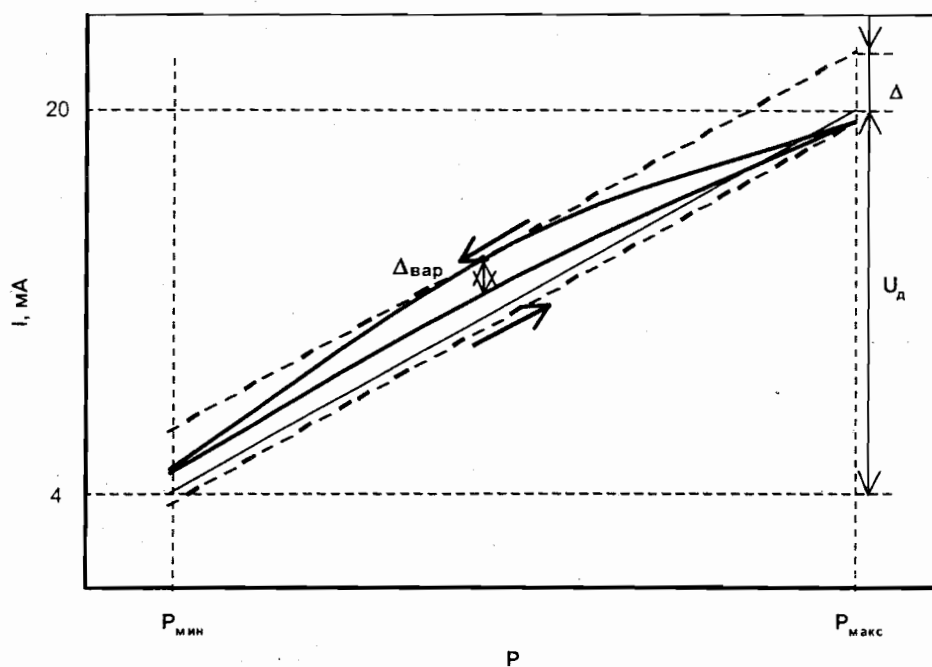


Рис. 1а Основная погрешность датчика со стандартным выходным сигналом 4-20 мА:  $\delta = \Delta / U_d$

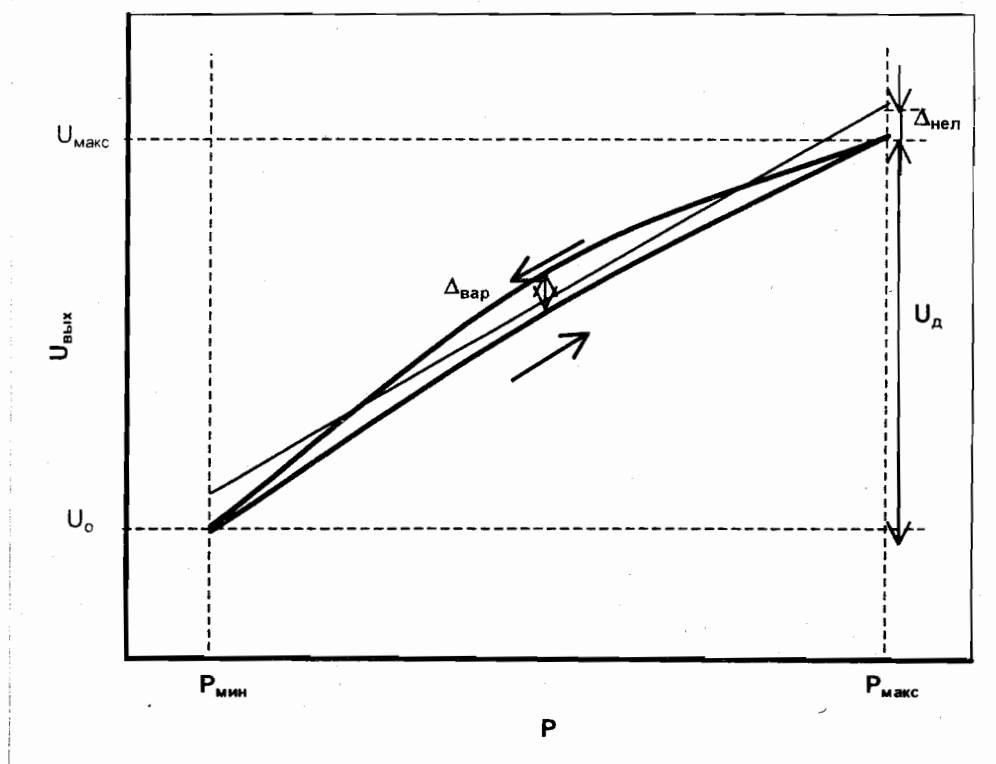


Рис. 1б Точность преобразователя:  $\delta = (\delta_{нел}^2 + \delta_{вар}^2 + \delta_{повт}^2)^{1/2}$ ;  $\delta_{нел} = \Delta_{нел} / U_d$ ,  $\delta_{вар} = \Delta_{вар} / U_d$

В современных условиях, когда в измерительных системах все более широко используются преобразователи давления с нормированным выходным сигналом, но без последующей его стандартизации электронной схемой, реальная характеристика преобразователя определяется его **точностью и дополнительной температурной погрешностью**, а не основной погрешностью. В настоящей работе мы подробнее остановимся на методах повышения точности преобразователей давления на основе структур КНС.

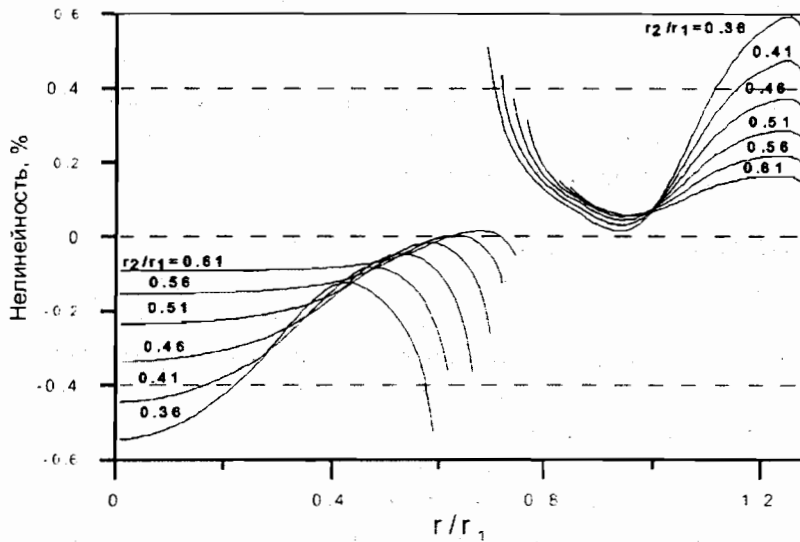
**НЕЛИНЕЙНОСТЬ.** Нелинейность преобразователей давления определяется двумя составляющими – нелинейностью механического преобразования измеряемого давления в деформацию сапфирового чувствительного элемента (ЧЭ) и нелинейностью тензорезистивного эффекта, т.е. преобразования деформации в относительное изменение сопротивления кремниевых тензорезисторов на сапфировой подложке. При питании тензорезисторной мостовой схемы постоянным напряжением возникает еще одна составляющая нелинейности выходного сигнала, которая исчезает, если изменения сопротивлений смежных плеч моста одинаковы [6].

Нелинейность механического преобразования связана с тем, что в реальных преобразователях давления высокой точности прогибы упругих элементов нельзя считать малыми, так что к работе преобразователей неприменимы простые линейные формулы, полученные из теории сопротивления материалов (см., например, [7]). Так, в работе [8] было показано, что нелинейность выходного сигнала преобразователя давления со стандартной мембраной чашечного типа и расположением тензорезисторов на краю мембраны существенно зависит от того, с какой стороны к мембране прикладывается измеряемое давление.

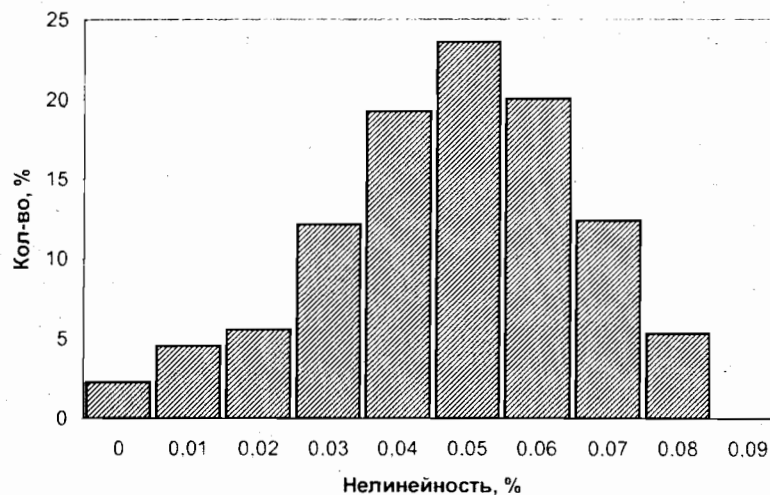
В более сложных конструкциях преобразователей давления для снижения нелинейности механического преобразования необходимо проводить, как правило, численные предварительные расчеты, используя метод конечных элементов. В качестве примера на рис.2 приведены результаты расчета механической нелинейности преобразователя давления, состоящего из воспринимающей давление мембраны и соединенной с мембраной жестким штоком металлической балки с напаянным сапфировым ЧЭ, закрепленной с двух сторон на кольцевом основании. Как видно из рисунка, нелинейность существенно зависит как от положения тензорезистора на балке, так и от диаметра  $2r_2$  штока, соединяющего балку с мембраной. Лишь при определенных конструктивах преобразователя на поверхности чувствительного элемента имеются места, в которых нелинейность механического преобразования давления в деформацию поверхности ЧЭ минимальна (менее 0,5%), где и необходимо располагать тензорезисторы мостовой схемы.

Вторая составляющая нелинейности определяется нелинейностью тензорезистивного эффекта в структурах КНС. Как было показано в [9], в структурах КНС зависимость сопротивления тензорезисторов от деформации хорошо описывается квадратичной зависимостью. Поэтому если располагать смежные тензорезисторы мостовой схемы в таких местах ЧЭ, где деформации одинаковы по величине и противоположны по знаку, то нелинейность тензоэффекта не будет влиять на линейность выходного сигнала преобразователя.

На рис.3 показано типичное распределение значений нелинейности серийных преобразователей давления, выпускаемых ПГ МИДА. Следует отметить, что к значениям левой части распределения следует относиться с осторожностью, поскольку измерения проводились с помощью грузопоршневого манометра класса 0,02. В настоящее время предприятием приобретен грузопоршневой манометр класса 0,005, что позволит уточнить минимальные достигаемые значения нелинейности.



**Рис.2** Распределение механической нелинейности преобразования давления в деформацию поверхности балки.  $r$  – расстояние от центра балки.  $2r_1$  – длина балки.  $r_2$  – радиус штока

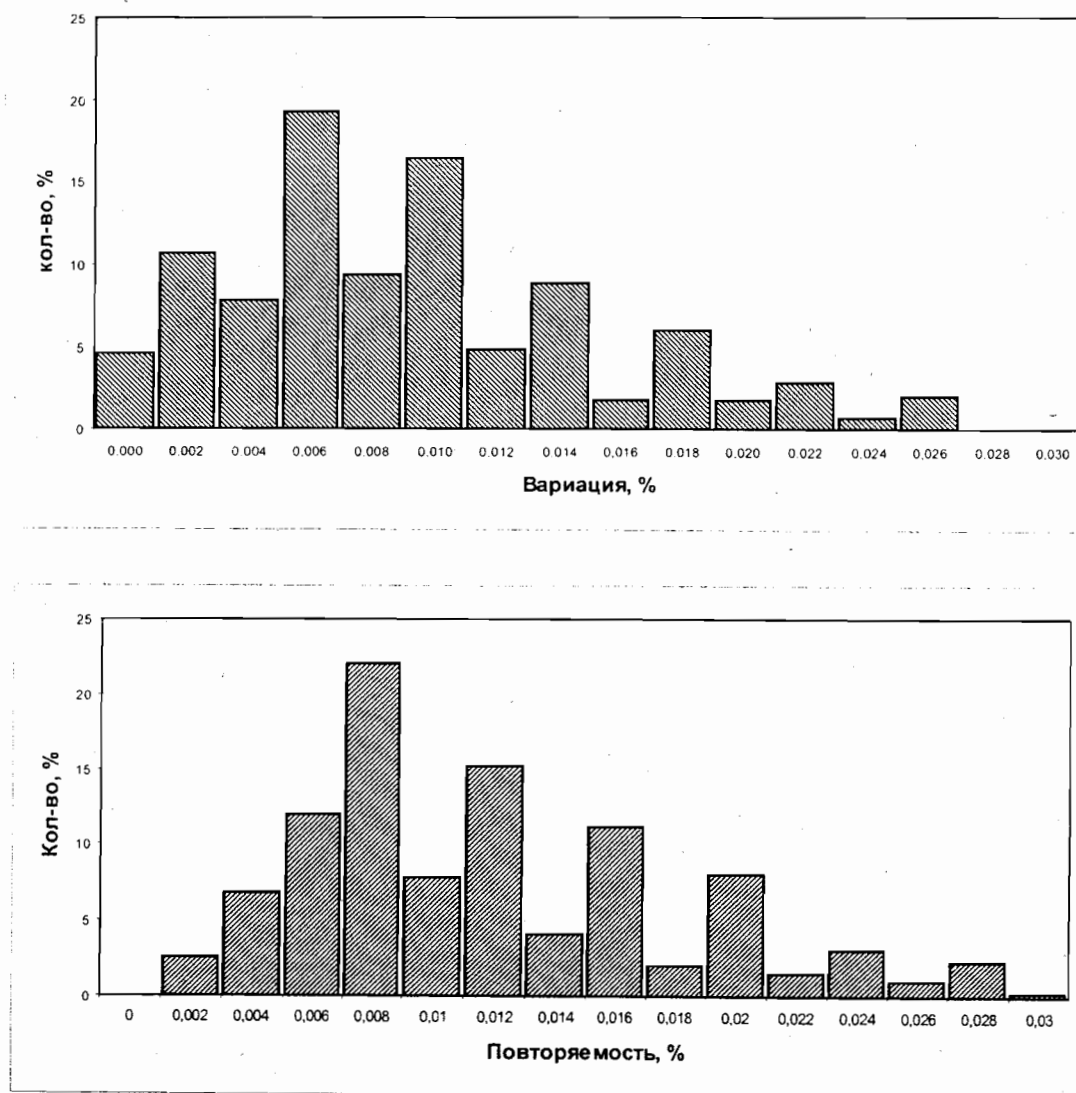


**Рис.3** Нелинейность преобразователей давления с пределом измерения 1 МПа (выборка 400 шт.)

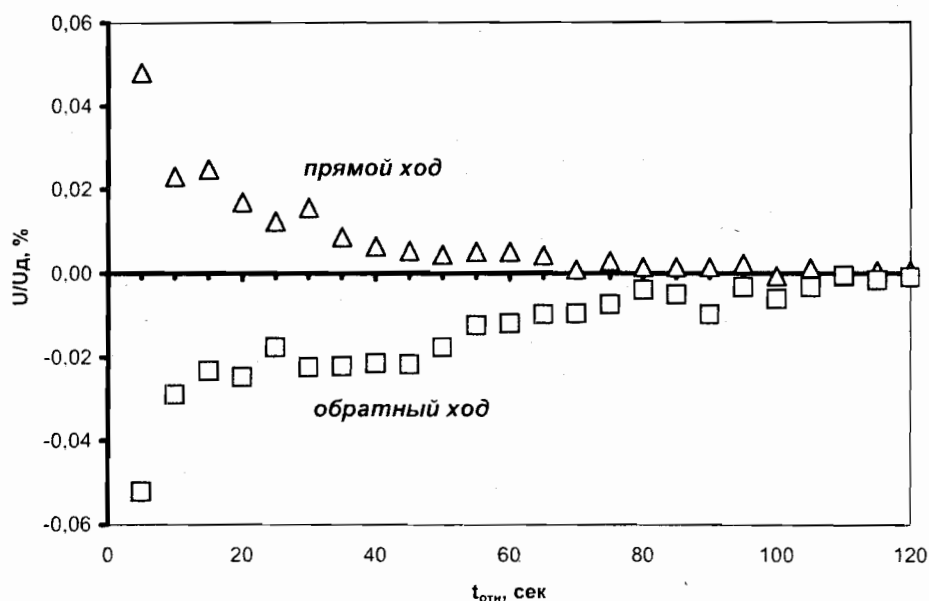
**ВАРИАЦИЯ.** Вариация выходного сигнала преобразователей давления определяется прежде всего свойствами материалов преобразователя. В монокристаллических материалах с высокими упругими характеристиками вариация практически отсутствует (если при изготовлении преобразователя в этот материал не вносятся дефекты). В основной массе конструкций преобразователей давления ПГ МИДА используются металлические упругие мембраны, изготовленные из сплавов ВТ-9 или 36НХТЮ, и чувствительные элементы из структур КНС, припаянные к мембране из титанового сплава ВТ-9 жестким припоем ПСР-72 [1]. Металлические элементы преобразователей соединяются либо сваркой (если они изготовлены из титановых сплавов), либо высокотемпературной пайкой.

В таких преобразователях источниками вариации являются в основном места сварки и пайки, а также те места конструкции, в которых при работе уровень деформации близок к пределу текучести металла. Для снижения вариации используются методы технологической стабилизации: термоциклирование, отжиг, циклическое нагружение давлением. В результате значения вариации серийных преобразователей не превышают 0,05% (рис.4а). Примерно такие же значения характерны и для повторяемости (рис.4б).

Следует отметить одну особенность определения вариации особо точных преобразователей. При задаче давления при испытаниях происходит адиабатический нагрев (или охлаждение) среды, которая передает давление на преобразователь; в результате возникает градиент температур, деформирующий преобразователь и дополнительно влияющий на выходной сигнал. Поэтому для определения истинной вариации необходимо после изменения давления произвести выдержку для стабилизации температуры (рис.5).



**Рис.4** Вариация (а) и повторяемость (б) преобразователей давления с диапазоном измерения 1 МПа (выборка 400 шт.)

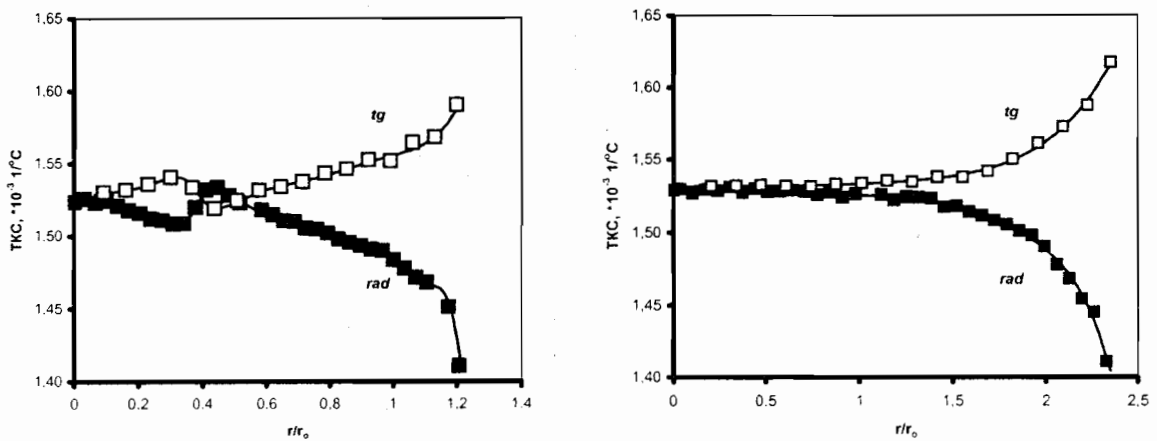


**Рис.5** Изменение выходного сигнала преобразователя после подачи давления маслом.

**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ.** Это одна из самых существенных составляющих погрешности микроэлектронных преобразователей давления, поскольку практически все характеристики полупроводниковых тензорезисторов сильно и нелинейно зависят от температуры. Кроме того, существенный вклад в эту составляющую погрешности вносят температурные зависимости механических свойств материалов и термические напряжения, возникающие в местах соединения разнородных материалов.

Температурная зависимость выходного сигнала преобразователей имеет две различные по происхождению составляющие. Первая – температурная зависимость начального выходного сигнала (температурный дрейф нуля) – в конечном итоге определяется разницей температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) тензорезисторов в смежных плечах мостовой схемы. Основной причиной температурного дрейфа нуля в преобразователях на основе КНС является сильная термическая деформация сапфирового чувствительного элемента после пайки на титановую мембрану.

Исследования, проведенные в ПГ МИДА, показали, что значения ТКС тензорезисторов на поверхности ЧЭ существенно зависят от их положения и ориентации относительно радиуса мембраны [10], причем вид распределения ТКС для одно- и двухмембранных преобразователей заметно различается (рис.6). Соответственно расположение тензорезисторов смежных плеч мостовой схемы в местах с минимальным различием в ТКС позволяет значительно уменьшить температурный дрейф нуля. Однако, при этом необходимо учитывать и возможное снижение чувствительности преобразователя к давлению; тем не менее, в результате оптимизации топологии тензочувствительной схемы температурный дрейф нуля удалось снизить в 3-6 раз по сравнению с предыдущими конструкциями преобразователей.



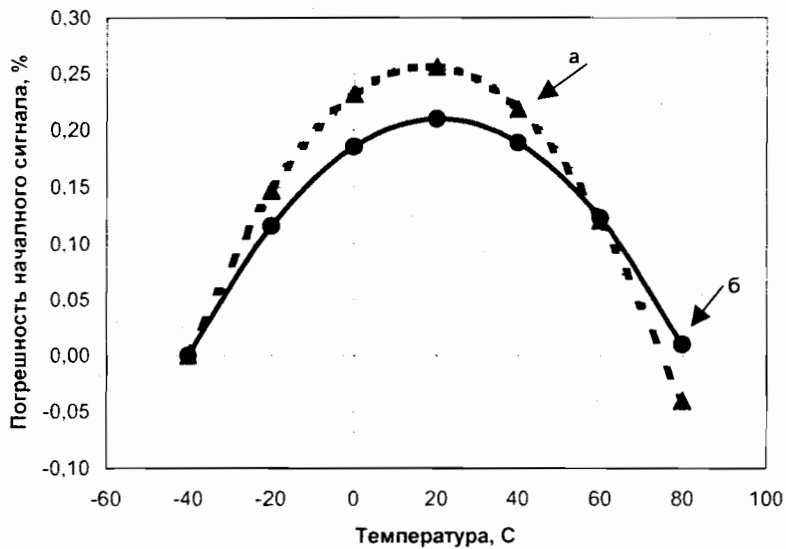
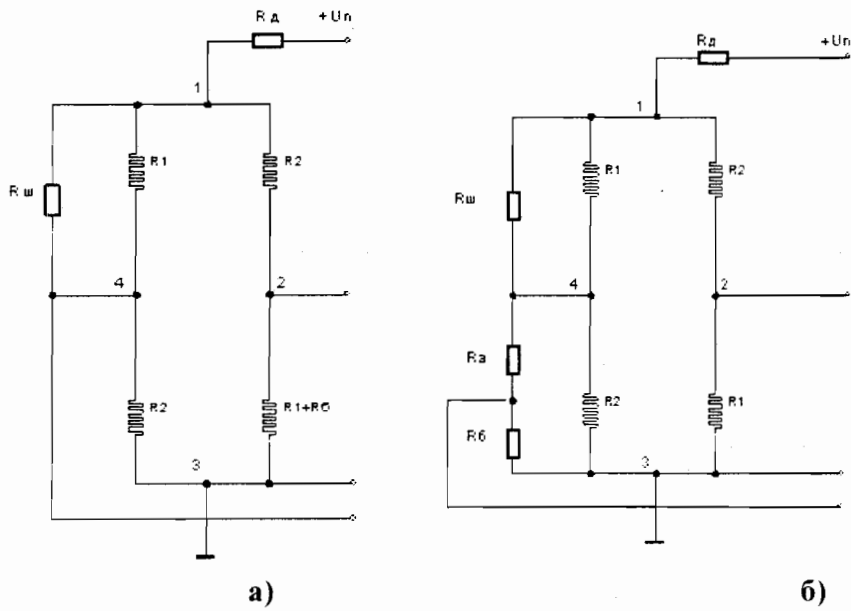
**Рис.6** Распределение температурных коэффициентов сопротивления продольных (*rad*) и поперечных (*tg*) тензорезисторов на поверхности ЧЭ двухмембранного (а) и одномембранного (б) преобразователя давления

Вторая составляющая температурной погрешности – температурный дрейф чувствительности – связана с температурной зависимостью упругих характеристик материалов и снижением тензочувствительности кремниевых резисторов с ростом температуры. Повышение уровня легирования кремния несколько снижает температурный коэффициент чувствительности, однако физико-технологическими методами ликвидировать эту составляющую невозможно.

Дальнейшее снижение температурной зависимости выходного сигнала возможно схемотехническими методами. Одним из самых привлекательных является использование постоянных резисторов, не зависящих от температуры [11]. Такую схему можно располагать в любом удобном месте, не заботясь о равенстве температур преобразователя и корректирующих элементов.

Реально в ПГ МИДА при производстве преобразователей применяются два типа схем коррекции температурной погрешности (Рис.7а,б). Резистор  $R_d$ , включаемый последовательно с мостовой схемой, служит для компенсации температурного дрейфа чувствительности, а резисторы, подключенные параллельно плечам моста – для компенсации температурного дрейфа нуля. При использовании схемы (а) последующая балансировка тензомоста производится с помощью подстроечных кремниевых резисторов  $R_c$ , расположенных на сапфировом ЧЭ [12], что широко используется в современных преобразователях на основе КНС. Однако, при этом изменяются значения сопротивлений плеч моста, что приводит к погрешности термокомпенсации с использованием расчетного резистора  $R_{ш}$  (кривая (а) на рис.7в), и, как следствие, к необходимости дополнительной эмпирической поправки компенсационного резистора.





**Рис.7** Коррекция температурного дрейфа нуля преобразователя давления с помощью постоянных резисторов, не зависящих от температуры

Более удобной является схема (б). Во-первых, при ее использовании нет необходимости в технологической балансировке моста. Это позволяет упростить топологию тензочувствительной схемы, уменьшить размеры ЧЭ, существенно упростить технологию температурной компенсации при отсутствии доступа к ЧЭ (например, в преобразователях абсолютного давления). Во-вторых, подбором элементов схемы легко производить подстройку величины начального сигнала преобразователей, унифицируя их характеристики. Наконец, при использовании расчетных резисторов схемы термокомпенсация осуществляется с большей точностью (кривая (б) на рис.7в).

В целом же при рассмотрении вопроса о повышении точности преобразователей давления необходимо иметь в виду, что разные составляющие точности имеют разную важность для измерительных систем.



Нелинейность преобразования (особенно если, как это часто бывает, реальная зависимость  $U(P)$  описывается квадратичным законом) достаточно легко снижается последующей обработкой выходного сигнала, например, микропроцессорной электронной схемой. То же самое можно сказать и о дополнительной температурной погрешности, хотя температурная зависимость выходного сигнала может быть достаточно сложной. Поэтому эти составляющие точности преобразователей давления не слишком критичны для измерительных систем, содержащих цифровую обработку сигнала. Как следует из проведенного рассмотрения, уменьшение этих составляющих точности достигается выбором оптимального уровня легирования КНС, а также конструктивным и схемотехническим способами.

Напротив, вариацию (гистерезис) и неповторяемость выходного сигнала преобразователя в принципе невозможно скомпенсировать обработкой сигнала, поэтому именно эти параметры в конечном итоге и определяют достижимую точность измерительных систем. То же относится к еще одной важнейшей характеристике преобразователей – их стабильности во времени, рассмотрение которой, впрочем, выходит за рамки настоящей работы; частично она рассмотрена в [13]. Эти составляющие чувствительности можно снизить только технологическим путем – оптимальным выбором материалов и методов стабилизации характеристик преобразователей.

В заключение отметим, что исследования и разработки, проведенные и проводимые в ПГ МИДА, показывают, что достижимая точность преобразователей давления на основе структур КНС (определяемая как среднеквадратичная сумма нелинейности, вариации и повторяемости) составляет не более 0,05% (такие преобразователи уже выпускаются серийно), а вариация и повторяемость может быть снижена до величины менее 0,01%.

#### Литература:

1. В.М.Стучебников «Кремний на сапфире как материал для тензопреобразователей механических величин». Радиотехника и электроника, 2005, т.50, №6, с.678-696;
2. Е.Е.Бушев, А.А.Никишин, В.М.Стучебников «Серийные датчики избыточного давления МИДА-ДИ-01П с чувствительными элементами на основе структур КНС» Микроэлектроника в машиностроении, Тезисы докладов Всесоюзной НТК, Ульяновск, 1992, с. 71;
3. Е.Е.Бушев, О.Л.Николайчук, В.М.Стучебников «Серия общепромышленных датчиков давления МИДА-13П» Датчики и Системы, 2004, №6, с.48-51;
4. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия. /ГОСТ 22520-85 (СТ СЭВ 4124-83);
5. В.М.Стучебников «О нормировании температурной погрешности тензорезисторных полупроводниковых датчиков». Датчики и Системы, 2004, №9, с.15-19;
6. Yang-Hong Zhang, Chen Yang et al. "A novel pressure microsensors with 30- $\mu\text{m}$ -thick diaphragm and meander-shaped piezoresistors partially distributed on high-stress bulk silicon region". IEEE Sensors Journal, 2007, No12, p.1742-1748;
7. Л.А.Андреева «Упругие элементы приборов». М.: Машиностроение, 1981;
8. Н.С.Папков, В.С.Папков, В.М.Стучебников «Нелинейность механического преобразования в микроэлектронных датчиках давления». Датчики и Системы, 1999, 35, с.30-34;
9. Г.И.Лурье, В.М.Стучебников, В.И.Суханов «Линеаризация выходного сигнала тензопреобразователей на основе структур КНС». Теоретические и экспериментальные



исследования в области создания полупроводниковых измерительных преобразователей /Сборник научных трудов М.: НИИТеплоприбор, 1986, с.15-25;

10. А.И.Козлов, А.В.Пирогов, В.М.Стучебников «Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Одномембранные преобразователи». Датчики и системы, 2008, №1, с.6-11;

11. Д.Б.Мартынов, В.М.Стучебников «Температурная коррекция тензопреобразователей давления на основе КНС» Датчики и Системы, 2002, №10 с.6-12;

12. А.В.Белоглазов, В.М.Стучебников и др. «Полупроводниковые преобразователи силы и давления на основе гетерозпитаксиальных структур Кремний на сапфире». Приборы и системы управления, 1992, №5, с.21,22,27;

13. Е.Е.Бушев, В.В.Волков и др. «Показатели стабильности и надежности микроэлектронных преобразователей и датчиков давления». Методы и средства измерения в системах контроля и управления. Труды международной научно-технической конференции. Пенза, 2002, с.152-153.

**Козлов Александр Ипатьевич**, инженер

**Мартынов Дмитрий Борисович**, начальник лаборатории

**Пирогов Александр Васильевич**, старший научный сотрудник

**Стучебников Владимир Михайлович**, генеральный директор ЗАО МИДАУС.

Россия, 432012, а/я 5370. [www.midaus.com](http://www.midaus.com)

Телефоны:

Общие: +7(8422) 66-66-60, 66-05-91, 66-06-41

Отдел маркетинга: +7(8422) 66-33-36 (тел), 66-33-91 (факс)

Отдел сбыта: +7(8422) 66-54-53

Электронная почта:

По общим вопросам: [info@midaus.com](mailto:info@midaus.com) или [mida@mv.ru](mailto:mida@mv.ru)

Отдел маркетинга: [sales@midaus.com](mailto:sales@midaus.com)