

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

(часть 1)

Г.И. Лурье
к.т.н.

Терминология. Под термином «датчик» принято понимать устройство, преобразующее какую-либо физическую величину (силу, массу, давление, магнитное поле, световой поток, радиацию и т.д.) в электрический выходной сигнал дистанционной передачи, значение которого пропорционально изменению входного параметра. Это определение отсекает показывающие приборы типа манометр, термометр и электрические сигнализаторы, работающие по принципу реакции на пороговые значения (больше/меньше заданной величины). В силу сложившейся традиции датчики у нас в стране иногда называют «измерительными преобразователями».

Настоящая работа посвящена анализу функциональных схем датчиков давления с целью выбора оптимальных решений для создания промышленных приборов.

1. ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

По своей физической природе давление (сила, действующая на единицу площади) не может быть измерена прямыми методами, то есть непосредственным сравнением с эталоном. Распределенную по поверхности силу надо заменить равнодействующей силой, приложенной к математической точке и преобразовать в физическую величину, доступную для наблюдения. Первым подобное устройство в 17 веке создал итальянский физик и математик Торричелли. Заполненная ртутью и запаянная с одного конца стеклянная трубка открытым концом погружается в сосуд с ртутью. Ртуть из трубки перетекает в сосуд, но под действием атмосферного давления останавливается на высоте, соответствующей значению этого давления. В день проведения эксперимента эта величина составила 760 мм, что в последствии было принято за «нормальное значение». Легко показать, что высота столба ртути прямо пропорциональна атмосферному давлению. Именно поэтому первыми единицами для измерения давления были мм. ртутного столба и воды. Однако, как мы уже видели, по своей природе давление не «расстояние между двумя точками», а сила. Отсюда появился метод, отражающий физическую сущность давления. Если на поршень, площадь которого точно известна, воздействовать калиброванной силой, то легко определить величину создаваемого поршнем давления (сила, деленная на площадь). На этом принципе и созданы самые точные образцовые приборы – грузопоршневые манометры. Очевидно, что этим методом удобно задавать давление по дискретным значениям.

Перед нами стоит иная задача – измерять непрерывно меняющуюся величину. Для выбора оптимальной схемы построения прибора, предназначенного для применения практически во всех отраслях промышленности, введем критерии, по которым будем сравнивать предполагаемые решения.

- Первым критерием будет способ преобразования механической величины в электрическую, обеспечивающий более высокую точность и стабильность измерения;

- Вторым критерием – технологическое воспроизведение этого способа в промышленных масштабах.

Итак, основным элементом наших датчиков является механоэлектрический преобразователь, то есть устройство, преобразующее давление, в электрический параметр: сопротивление, емкость, электрический заряд и т.д. Последнее время для простоты речи термин «механоэлектрический преобразователь» заменяют понятием «сенсор», в данном случае сенсор давления. Сенсор должен иметь чувствительный элемент (ЧЭ), который воспринимает распределенную по поверхности силу и преобразует механическую энергию в электрическую.

Исторически первую группу ЧЭ образуют устройства, в которых давление преобразуется в силу, вызывающую перемещение математической точки ее приложения. Наиболее распространенными ЧЭ этого типа являются трубка Бурдона, которая «разгибается» под действием давления, сильфон и мембранная коробка, жесткий центр которых совершает поступательное движение.



Рис. 1 Трубка Бурдона (а) и сильфон (б)

Итак, ЧЭ преобразует давление жидкости или газа в перемещение. Перемещение ЧЭ создает силу, которая в свою очередь вызывает перемещение соленоида в магнитной катушке (индуктивный датчик), перемещение контакта по поверхности резистора потенциометра (потенциометрический датчик), смещение обкладки конденсатора (емкостной датчик) и т.д. При сбросе давления трубка или мембрана должны вернуться в исходное состояние. Величина невозврата обычно называется упругим гистерезисом и является источником неустранимой погрешности прибора. Очевидно, что чем больше величина перемещения, тем больше значение выходного сигнала. Вместе с тем, чем больше перемещение, тем больше упругое последствие материала ЧЭ, а значит, и нелинейность, гистерезис, временная нестабильность. Преимуществами этой схемы преобразования являются простота реализации защиты от перегрузки измеряемым давлением и относительная несложность изготовления датчиков невысокой точности.

Вторую группу (современную) образуют сенсоры, в которых давление преобразуется в деформацию упругой мембраны. Давление так и остается распределенной силой, а ЧЭ является вся поверхность мембраны, прогибающейся под действием давления.

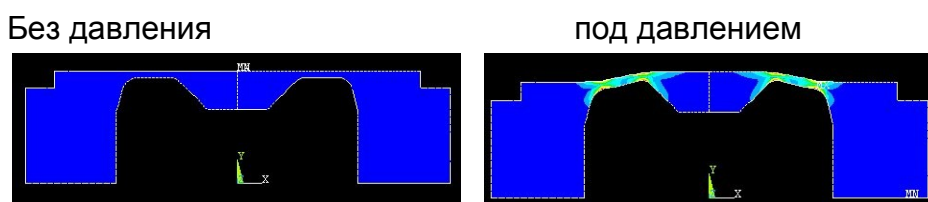


Рис. 2 Схема типичного кремниевого ЧЭ

Для того, чтобы зависимость прогиба мембраны от давления была близка к линейной, центр мембраны «омертвляют», делая его «жестким», то есть несоизмеримо толстым по сравнению с рабочей поверхностью мембраны. Для расчета деформационной картины используют величину хода «жесткого центра».

Деформацию активной поверхности мембраны преобразуют в электрический параметр с помощью так называемых тензорезисторов, то есть резисторов, значение сопротивления которых изменяется в результате их деформации.

Технология нанесения тензорезисторов может быть различной: от элементарного приклеивания до диффузионного внедрения. Изменение величины резисторов, обычно соединенных в мостовую схему, приводит к разбалансу моста, то есть, мы сразу получаем электрический выходной сигнал, изменяющийся пропорционально входному параметру.

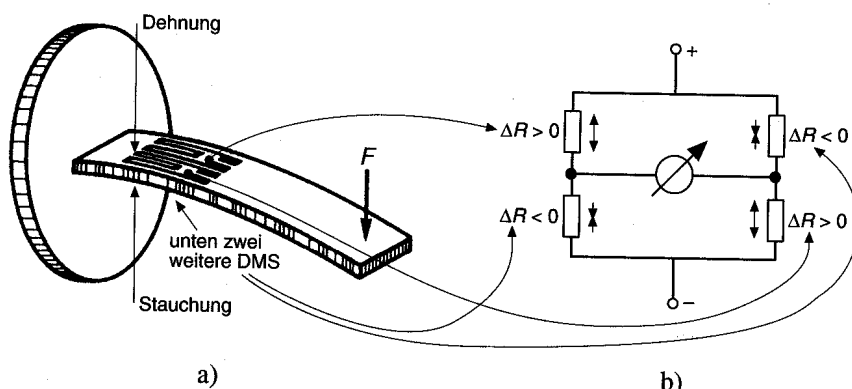


Рис.3. Схема механоэлектрического преобразователя на основе замкнутого моста

Сравним точности измерения, достижимые в двух рассмотренных способах преобразования, на примере сенсоров, выпускаемых нашим объединением. В потенциометрических датчиках СИГНАЛА величина перемещения составляет 200-400 мкм. Оцифруем эту шкалу (для наглядности пусть диапазон цифрового сигнала составляет 1000 единиц). Таким образом, цена одного «деления» на нашем приборе составит 0,2-0,4 единицы шкалы. Перемещение центра мембранного тензопреобразователя завода МАНОМЕТР составляет всего 5-6 мкм. В этом случае цена «деления» составит 0,006 мкм, то есть при одном и том же диапазоне измерения, мы можем различить значение давления в 60 раз более мелкое, чем в первом способе. Следует отметить, что в виду малых перемещений упругого элемента, гистерезис у таких ЧЭ должен быть меньше, а стабильность выше.

Итак, очевидно, что по первому критерию мы должны выбрать схему с минимальным перемещением. Этому условию соответствуют два технических решения. Мембранный преобразователь «давление→деформация», мембранный преобразователь «давление→малые перемещения». Деформация в электрический выходной сигнал может быть преобразована двумя способами: либо с помощью тензорезисторов, либо за счет изменения собственной частоты колебаний деформированной балки, жестко связанной с мембраной (Yokogawa). Малые перемещения можно преобразовать в изменение емкости конденсатора, одна из обкладок которого является упругой мембраной (Rosemount). Следует отметить, что это решение является единственной разработкой емкостного сенсора, выпускаемой в промышленных масштабах уже более полувека. Схема преобразователя Rosemount представлена на рисунке 4.

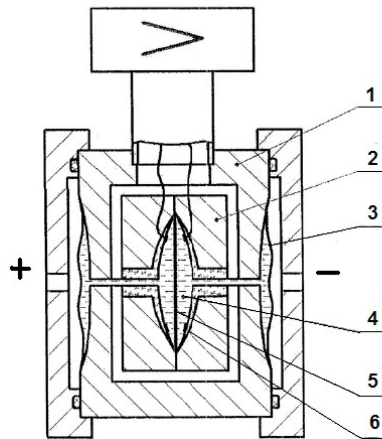


Рис. 4. Схема емкостного преобразователя Rosemount .

Измерительный блок датчиков разности давления состоит из корпуса 1 и емкостной измерительной ячейки 2. Измеряемое давление передается через разделительные мембраны 3 и разделительную жидкость 4 к измерительной мембране 5, расположенной в центре емкостной ячейки. Воздействие давления вызывает изменение положения измерительной мембраны. Изменение положения мембраны приводит к появлению разности емкостей между измерительной мембраной и пластинами конденсатора 6, расположенным по обеим сторонам от измерительной мембраны.

Как видно на рисунке, схема емкостного сенсора естественным образом вписывается в датчик разности давлений. Однако, технология изготовления сенсора очень сложна. **Емкостная ячейка изолирована механически, электрически и термически от технологической измеряемой среды и окружающей среды.** Не случайно все остальные типы датчиков концерн EMERSON, владеющий технологией Rosemount, выпускает на основе полупроводникового тензорезисторного сенсора.

Вообще, способ преобразования на основе использования тензорезисторов получил наибольшее распространение в промышленности.

Тензорезисторы могут быть выполнены из металла или полупроводника, наклеены или выращены на поверхности мембраны. Сразу отметим, что технология изготовления тензорезисторов определяет как чувствительность сенсора, так и его стабильность. Металлические тензорезисторы имеют очень маленькую чувствительность, так как значение сопротивлений изменяются только в соответствии с изменением геометрических размеров. Сопротивление растет пропорционально удлинению резистора и уменьшению его поперечного сечения в результате деформации. У металлов максимальный коэффициент тензочувствительности достигает 2-х единиц, обычно – 1,6. Главным достоинством металлических тензорезисторов на ранних стадиях развития подобных сенсоров была простота и низкая стоимость изготовления тензорезисторов из фольги. Однако использование клеев приводило к нестабильности показаний прибора. Кроме того, тонкий слой клея не обеспечивал хорошей изоляции между тензорезисторами и мембраной. Современный уровень технологий позволяет наносить на металлическую мембрану тонкий слой диэлектрика, а затем металлические резисторы. Наиболее ярким представителем этого направления является швейцарская фирма TRAFAG.

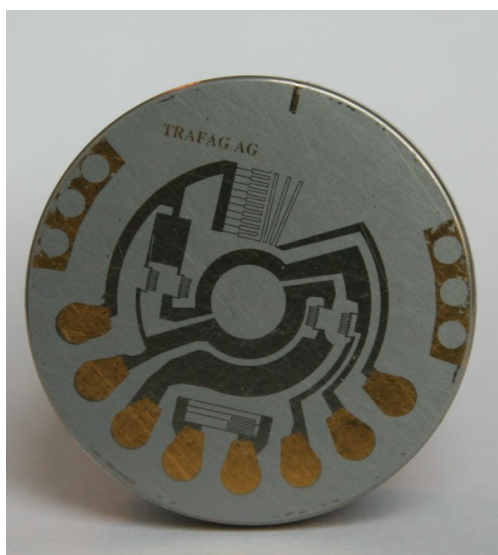


Рис. 5 Типичный сенсор со структурой «металл-диэлектрик-металл»

Та же фирма TRAFAG выпускает упрощенный вариант сенсора – металлические тензорезисторы наносятся на керамическую мембрану. По данным фирмы такие сенсоры имеют более низкую чувствительность, меньшую стабильность «нуля», стоят дешевле.

В полупроводниках тензоэффект связан с тонкой зонной структурой, зависит от кристаллографической ориентации, типа проводимости, и в кремнии может достигать 120 единиц. Еще одним преимуществом полупроводниковых сенсоров является возможность повысить выходной сигнал за счет одновременного использования в одном ПЧЭ поперечного и продольного тензоэффекта. Увеличивается или уменьшается сопротивление тензорезистора, зависит от того, совпадает направление тока в нем с направлением деформации или они взаимно перпендикулярны. Тензосхема строится таким образом, чтобы в противоположные плечи моста были включены тензорезисторы одного типа (см. рис. 3), в результате при одной и той же величине напряжения питания выходной сигнал повышается в 4 раза по сравнению с единичным резистором.

В случае применения монокристаллического кремния вытравливается «чашечка», как показано на рис. 2. Обычно используется кремний n-типа проводимости, а резисторы формируются диффузией или эпитаксией p-слоя. Таким образом, изоляция обеспечивается p-n переходом. Поскольку в этом случае резисторы связаны с мембраной на атомарном уровне, такой ЧЭ часто называют «интегральный тензопреобразователь». Естественно, такие структуры не могут работать при повышенных температурах, в условиях радиации и так далее. Но технология травления кремния настолько хорошо отработана в микроэлектронной промышленности, что на этой основе делают емкостные и частотные сенсоры. Дальнейшим развитием этого направления является создание структуры «кремний-диэлектрик-кремний». Слой диэлектрика (окись и нитрид кремния) является более надежной изоляцией, чем p-n переход. Однако, при применении интегрального тензопреобразователя возникает новая проблема – прочная и герметичная заделка кристалла кремния в металлический корпус. У нас в стране в промышленном масштабе эта проблема пока не решена. За рубежом такой сенсор является одним из самых распространенных, не только в общепромышленных датчиках, но и спецтехнике, где лидером является фирма Kulite Semiconductor Products. Фирма Kulite развивает эти технологии более полувека под руководством одного из основоположников полупроводниковой тензометрии - доктора Anthony D. Kurtz.

Следует отметить, что датчики Kulite являются дорогостоящими изделиями. В Европе получили распространение более простые сенсоры, например, Honeywell или фирмы STS (Германия) .

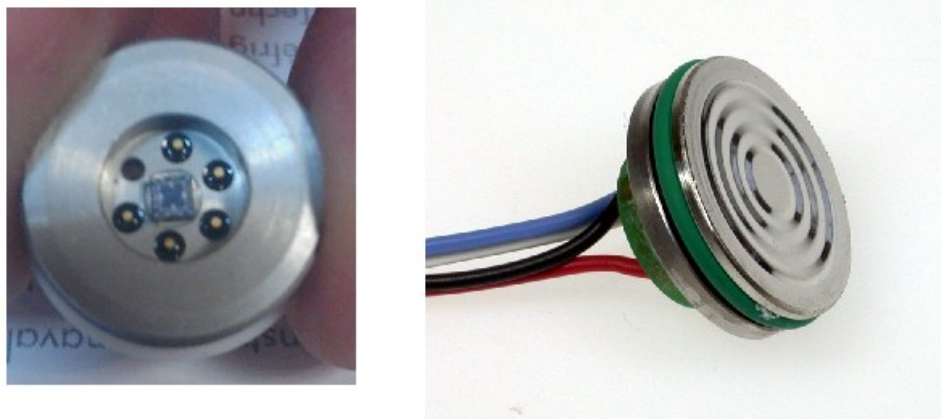


Рис . 6 .Кремниевый интегральный сенсор фирмы STS

Идеальным решением для создания сенсора давления в нашей стране оказалось применение структуры «кремний на сапфире» (КНС или в англоязычной литературе SOS). На рисунке представлен наш сенсор давления в разрезе.

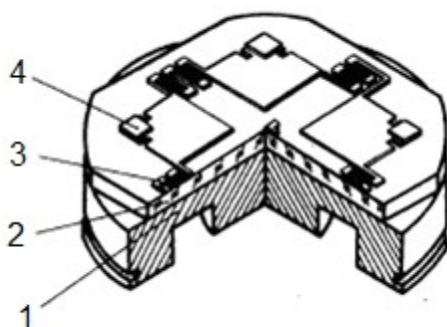


Рис.7 Схема тензопреобразователя на основе структуры КНС

1. Металлическая мембрана (дисперсионно твердеющий сплав титана)
2. Монокристаллический сапфир
3. кремниевый тензорезистор
4. контактные площадки

Монокристаллический сапфир является идеальным изолятором. На пластине сапфира, вырезанной в определенном направлении, методом эпитаксии выращивается монокристаллическая пленка кремния. Затем методом фотолитографии формируются полупроводниковые чувствительные элементы.

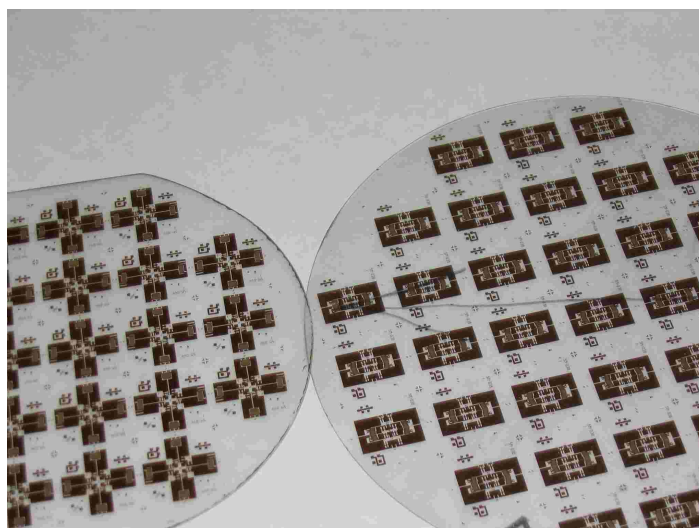


Рис. 8 Структуры КНС с тензосхемами

После разделения такой пластины на ПЧЭ, отдельный элемент методом вакуумной высокотемпературной пайки (850 °С) соединяется с титановой мембраной. Сапфир чрезвычайно химически инертный материал, но в присутствии титана допускает диффузию атомов серебра по вакансиям кислорода в своей кристаллической решетке. В результате слоеный «пирог» металл-диэлектрик-полупроводник оказывается соединенным на атомарном уровне. Сенсор на основе структуры КНС обладает высокой чувствительностью, стабильностью, практически не имеет механического гистерезиса, может работать в широком диапазоне температур от минус 270 до плюс 350 °С и при воздействии радиации. Еще одним достоинством такого сенсора является простота изготовления ЧЭ на разные пределы измерений, возможность изготовления сенсора с открытой мембраной, использование во всех конструкциях унифицированного ПЧЭ.

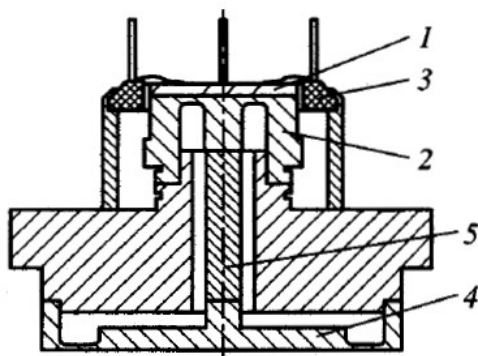


Рис. 9. Сенсор с открытой мембраной.

1. ПЧЭ на основе КНС
2. титановый корпус с измерительной мембраной
3. кольцо-коллектор для подвода питания и снятия сигнала
4. мультипликативная мембрана, воспринимающая давление измеряемой среды
5. шток, передающий силу от мультипликативной к измерительной двухслойной мембране

Изменяя параметры мембраны 4, можно в широких пределах изменять диапазон измерения. Приварив к измерительному узлу штуцер, мы получаем законченный сенсор давления.

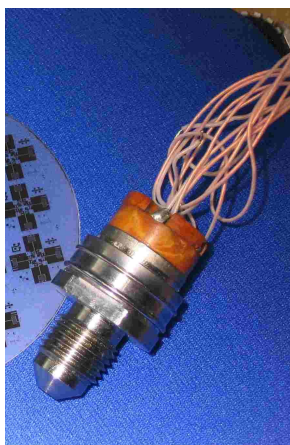


Рис. 10. Двухмембранный сенсор давления

Необходимо отметить, что все датчики давления, выпускавшиеся в СССР в массовом производстве, были основаны на сенсорах с КНС структурой. Датчики систем САПФИР-22 использовались во всех отраслях народного хозяйства от химии и машиностроения до тепловой и атомной энергетики. Метрологические и эксплуатационные характеристики сенсоров на основе КНС постоянно совершенствуются. Так сенсоры давления, использовавшиеся в датчиках «САПФИР-22М» применялись для измерения давлений не ниже 0,1 МПа, а в современных датчиках МИДА-13П минимальный диапазон измерения составляет 4 кПа.

Сенсоры на основе КНС структур не получили на западе широкого распространения в силу высокоразвитой технологии производства кремниевых микросхем – эта же технология используется при производстве интегральных кремниевых преобразователей. Однако, кремниевые сенсоры не составляют конкуренции продукции фирмы Sensonetics (США) – все датчики этой фирмы основаны на применении структур КНС. Основные потребители датчиков Sensonetics – Пентагон, НАСА, атомная энергетика и другие отрасли, требующие работоспособность датчиков в жестких условиях эксплуатации.

На рисунке 11 представлен датчик фирмы Sensonetics, измеряющий одновременно и давление и температуру.

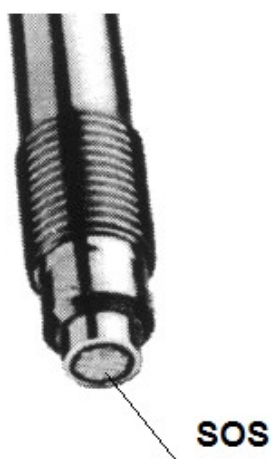
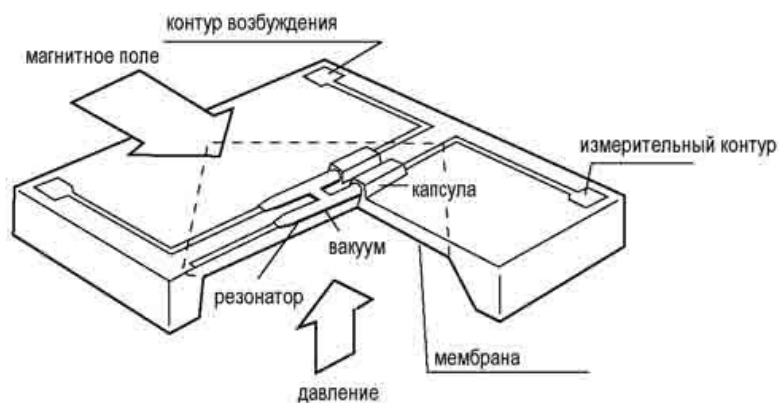


Рис. 11. Типичный сенсор на основе технологии КНС (SOS)

Стрелкой показан ПЧЭ – структура КНС. Датчики американской фирмы работают при температуре измеряемой среды до 1000 F (538 °C)

Рассмотренному типу сенсоров: давление → деформация (малые перемещения) соответствует созданный с применением высоких технологий резонаторный сенсор фирмы Yokogawa – кремниевый балочный резонатор.

Принцип работы кремниевого резонатора:



В зависимости от знака приложенного давления резонатор растягивается или сжимается, в результате чего частота его собственных механических колебаний соответственно растет или уменьшается. Колебания механического резонатора в постоянном магнитном поле преобразуются в колебания электрического контура, и, в итоге, на выходе чувствительного элемента получается цифровой (частотный) сигнал, точно отражающий величину измеряемого давления.

(продолжение следует)