

Модуль 3 Измерительные преобразователи давления

План лекции

- 3.1 Датчики давления. Общие сведения
- 3.2 Деформационные преобразователи
- 3.3 Магнитоупругие преобразователи
- 3.4 Тензорезисторные преобразователи
- 3.5 Пьезоэлектрические преобразователи

3.1 Датчики давления. Общие сведения

Внешнее давление P на поверхность S жидкой или газообразной среды, равное отношению нормальной составляющей суммы сил F , приложенной извне, к площади поверхности S , передается внутрь среды без изменений и равномерно во все стороны. Порождаемое внутреннее давление направлено перпендикулярно к любой внутренней площадке среды ΔS , независимо от ее формы и положения в среде, а величина давления в среде пропорциональна величине выделенной площадки (закон Паскаля). Очевидно, что $P=F/S=\Delta F/\Delta S$ для любой точки среды. Внутреннее давление покоящихся жидких и газообразных сред зависит не только от внешнего давления, но и от веса самой среды.

На практике давление газообразных и жидких сред может измеряться относительно двух различных уровней:

- 1) уровня абсолютного вакуума, или абсолютного нуля давления – идеализированного состояния среды в замкнутом пространстве, из которого удалены все молекулы и атомы вещества среды;
- 2) уровня атмосферного или барометрического давления.

Давление, измеряемое относительно вакуума, называют давлением абсолютным (ДА). Барометрическое давление (ДБ) – это абсолютное давление земной атмосферы. Оно зависит от конкретных условий измерения: температуры воздуха и высоты над уровнем моря. Давление, которое больше или меньше атмосферного, но измеряется относительно атмосферного, называют соответственно избыточным (ДИ) или давлением разрежения, вакуумметрическим (ДВ). Очевидно, что $ДА=ДБ+ДИ$ или $ДА=ДБ-ДВ$. При измерении разности давлений сред в двух различных процессах или двух точках одного процесса, причем таких, что ни одно из давлений не является атмосферным, такую разность называют дифференциальным давлением (ДД).

В Международной системе единиц СИ единицей силы является Н (ньютон), а единицей площади – м^2 . Отсюда определяется единица давления паскаль $\text{Па}=1 \text{ н/м}^2$ и ее производные, например, килопаскаль ($1 \text{ кПа}=10^3 \text{ Па}$), мегапаскаль ($1 \text{ МПа}=10^6 \text{ Па}$). Наряду с системой СИ в области измерения давления продолжают использоваться единицы и других, более ранних систем, а также внесистемные единицы. В технической системе

единиц МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда) сила измеряется в килограммах силы (1 кгс $\approx$ 9,8 Н). Единицы давления в МКГСС – кгс/м² и кгс/см²; единица кгс/см² получила название технической атмосферы (ат).

В физической системе единиц СГС (сантиметр, грамм, секунда) единицей силы является дина (1 дин=10⁻⁵ Н). В рамках СГС введена единица давления бар (1 бар=1 дин/см²). Существует одноименная внесистемная, метеорологическая единица бар, или стандартная атмосфера (1 бар=106 дин/см²; 1 мбар = 10⁻³ бар = 103 дин/см²). Кроме указанных единиц на практике используется такая вне-системная единица, как физическая или нормальная атмосфера (атм), которая эквивалентна уравнивающему столбу 760 мм рт. ст.

В таблице 3.1 указаны коэффициенты перевода одних системных или внесистемных единиц давления в другие.

Таблица 3.1 – Таблица соответствия единиц давления

Единицы давления	Па (Pa)	кгс/см ² (ат)	бар (bar)	атм (atm)	мм рт. ст. (mm Hg)	мм вод. ст. (mm H ₂ O)
1 Па=1 н/м ²	1	1,01972×10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	0,98692×10 ⁻⁵	750,06×10 ⁻⁵	0,101972
1 ат=1 кгс/см ²	0,980665×10 ⁵	1	0,980665	0,96784	735,563	10 ⁴
1 бар=10 ⁶ дин/см ²	10 ⁵	1,01972	1	0,98692	750,06	1,01972×10 ⁴
1 атм=760 мм рт.ст.	1,01325×10 ⁵	1,0332	1,01325	1	760	1,0332×10 ⁴
1 мм рт. ст.	133,322	1,35951×10 ⁻³	1,33322×10 ⁻³	1,31579×10 ⁻³	1	13,5951
1 мм вод. ст.	9,80665	10 ⁻⁴	9,80665×10 ⁻⁵	9,67841×10 ⁻⁵	7,3556×10 ⁻²	1
1 psi=1 lbf/in ²	6,894×10 ³	≈0,07	6,894×10 ⁻²	0,068	51,715	703,08

По виду измеряемого давления манометры подразделяют на приборы измерения избыточного и абсолютного давления – собственно манометры, разрежения – вакуумметры, давления и разрежения – мановакуумметры, атмосферного давления – барометры и разностного давления – дифференциальные манометры (дифманометры). Манометры, вакуумметры и мановакуумметры для измерения небольших (до 20÷40 кПа) давлений газовых сред называют соответственно напоромерами, тягомерами и тягонапоромерами, а дифманометры с таким диапазоном измерения – микроманометрами. Технические характеристики всех этих средств измерения давления определяются соответствующими общими техническими условиями.

Измерительные преобразователи давления (ИПД) по способу обработки и отображения измеряемого давления подразделяют на первичные (формируют для дистанционной передачи выходной сигнал, соответствующий измеряемому давлению) и вторичные (получают сигнал от первичных преобразователей, обрабатывают его, накапливают, отображают и передают на более высокий уровень системы).

Современная тенденция развития ИПД заключается в их «интеллектуализации» на базе микроэлектронной технологии и микропроцессорной техники, предполагающей передачу части функций

системы управления вторичным преобразователям, а некоторых традиционных функций вторичных преобразователей – первичным.

3.2 Деформационные преобразователи

В промышленности при локальных измерениях давления энергоносителей широко используются деформационные манометры на основе одновитковой трубчатой пружины (трубки Бурдона) для прямопоказывающих стрелочных приборов или с многовитковыми пружинами для самопишущих манометров.

В пружинных манометрах используются различные пружины – трубчатая многовитковая (геликоидальная), трубчатая одновитковая, пластинчатая (мембрана) и гармоникообразная (сильфон), показанные на рисунке 3.1.

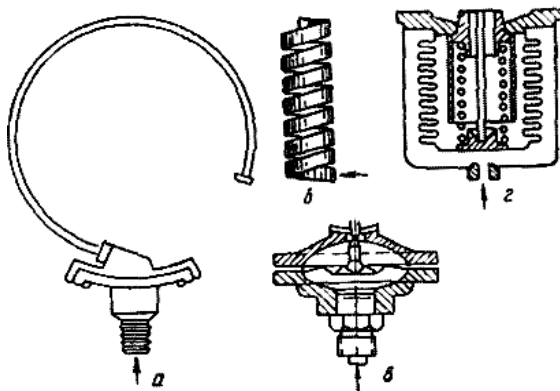


Рисунок 3.1 – Упругие элементы: а – трубчатая пружина;
б – многовитковая трубчатая пружина; в – мембрана; г – сильфон*

*Использованы иллюстрации из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Манометр с трубчатой пружиной применяют для измерения давления в очень широких пределах. На рисунке 3.2 показана конструкция такого манометра с секторным передаточным механизмом.

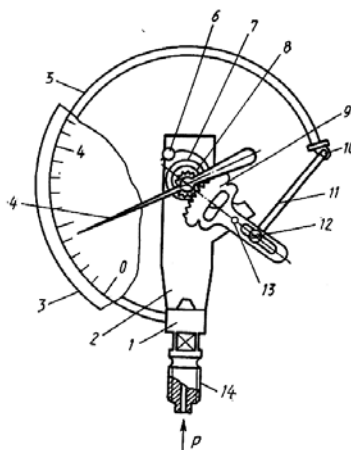


Рисунок 3.2 – Схема манометра с одновитковой трубчатой пружиной*

*Использованы иллюстрации из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Прибор состоит из трубчатой пружины 5, один конец которого впаян в отверстие держателя 1, а другой наглухо запаян и несет на себе наконечник 10. Полость пружины связана с измеряемой средой через канал в держателе 1, снабженным радиальным штуцером 14. Держатель прибора оснащен платой 2, на которой монтируется трубко-секторный механизм. Последний включает в себя зубчатое колесо (трубку) 8 и зубчатый сектор 9. Для исключения люфта в передаточном механизме используется спиральная пружина 7, один конец которой с помощью штифта крепится на оси трубки, а другой – к колонке 6, укрепленной на плате 2. К хвостовику сектора 9 с помощью винта 12 крепится тяга 4. Посредством тяги перемещение свободного конца пружины передается зубчатому сектору, который имеет ось вращения 14. Вращение зубчатого сектора передается трубке, на оси которой насажена стрелка 4 для отсчета показаний на шкале 4. Шкала манометра равномерная, поскольку перемещение свободного конца пружины пропорционально измеряемому давлению. Регулировка хода стрелки производится винтом 12.

Вакуумметр с одновитковой трубчатой пружиной конструктивно идентичен рассмотренному манометру. Отличие состоит только в шкале и направлении перемещения стрелки. Особенностью мановакуумметра является стрелка, которая выполняется с нулем в средней части.

Наряду с рассмотренными приборами, оснащенными одинаковой трубчатой пружиной, в практике измерения давления и разрежения получили широкое распространение манометры и вакуумметры, снабженные электроконтактными сигнализирующими устройствами. Эти средства измерений давления получили название электроконтактных. Класс точности электроконтактных манометров и вакуумметров, как правило, составляет 1,5.

Электроконтактные манометры делят на манометры с микровыключателями и с магнитомеханическими контактами. Кроме того выпускаются приборы во взрывозащищенном исполнении и виброустойчивые или жидконаполненные (заполнены диэлектрическим маслом, чаще всего глицерином для обеспечения успокоительного эффекта электромеханической системы при повышенной пульсации измеряемой среды).

Схема включения электроконтактных манометров с микровыключателями серии ЭКМ представлена на рисунке 3.3.

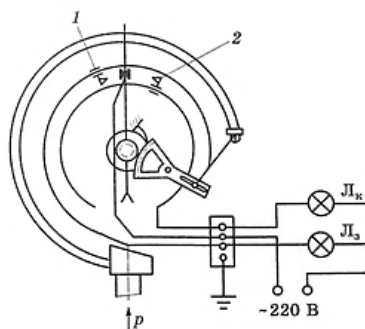


Рисунок 3.3 – Электроконтактный манометр серии ЭКМ*

*Использованы иллюстрации из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Электроконтактный манометр обеспечивает коммутацию электрических цепей в зависимости от величины измеряемого давления.

На рисунке 3.4 показан манометр с упругой металлической концентрически гофрированной мембраной, зажатой между двумя фланцами.

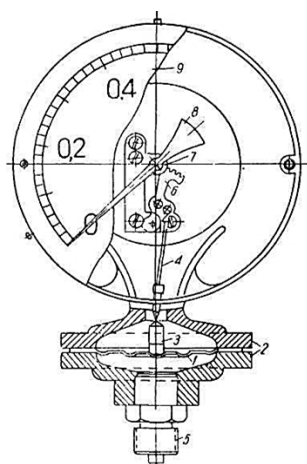


Рисунок 3.4 – Манометр с металлической мембраной*

*Использованы иллюстрации из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Штуцер в нижнем фланце соединяет манометр прямым каналом с измеряемой средой. Под воздействием усилия давления мембрана прогибается пропорционально величине этого давления. Стойка в центре мембраны, соединенная при помощи шарнира с поводком зубчатого сектора передаточного механизма, перемещает на соответствующий угол стрелку по шкале прибора.

Благодаря непосредственному сообщению полости мембраны с измеряемой средой этим манометром удобно пользоваться для измерения давления вязких жидкостей (мазут, смола и др.). Основная погрешность прибора составляет 2,5 или 4 % от верхнего предела шкалы.

3.3 Магнитоупругие преобразователи

В горной промышленности получили также распространение магнитоупругие преобразователи, действие которых основано на использовании эффекта зависимости магнитной проницаемости μ от величины механического воздействия (сжатия или растяжения) на ферромагнитный сердечник преобразователя. Это свойство называют магнитоупругостью и характеризуют чувствительностью $S_\mu = d\mu / dl$. Наибольшим значением $S_\mu = 200 \text{ Гн/м}^2$ обладает пермаллой (железоникелевый сплав).

В общем случае магнитоупругий эффект имеет нелинейный характер, зависит от значения напряженности приложенного поля H . Однако, выбирая соответствующие режимы работы, можно получить линейные участки зависимости. Происходящее под действием механической нагрузки одновременное изменение магнитной проницаемости и линейных размеров сердечников можно использовать для измерения давления, усилий, моментов деформаций. Относительную чувствительность магнитоупругого материала можно характеризовать (подобно тензорезисторам) коэффициентом тензочувствительности.

Различают магнитоупругие датчики дроссельного (рис. 3.5, а) и трансформаторного (рис. 3.5, б, в) типов. Последние могут контролировать только усилие сжатия, однако обладают большей чувствительностью. Питание преобразователя при измерении статических или медленно изменяющихся нагрузок осуществляется обычно от сети переменного тока частотой 50 Гц. Иногда, чтобы повысить чувствительность, преобразователи питают током повышенной частоты (до 10 кГц).

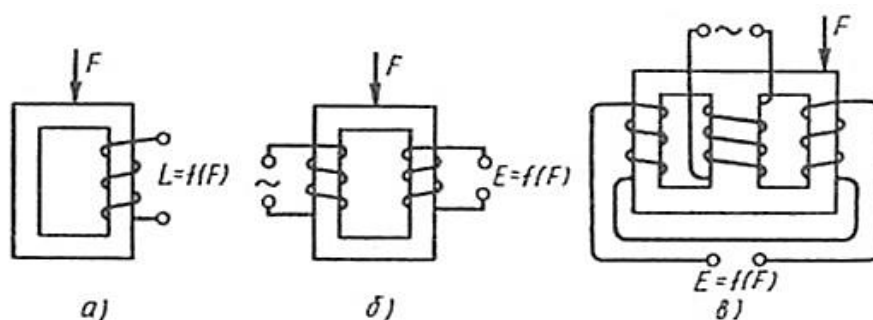


Рисунок 3.5 – Магнитоупругие датчики*

*Использованы иллюстрации из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

В магнитоупругих преобразователях трансформаторного типа в качестве переменной величины, являющейся функцией приложенной силы, используется взаимная индуктивность, поэтому преобразователи трансформаторного типа являются, по существу, трансформаторами с переменным коэффициентом трансформации. Чувствительность датчиков

подобного типа достигает нескольких милливольт на ньютон (мВ/Н).

Достоинствами магнитоупругих преобразователей являются простота и надежность в работе, значительная мощность выходных сигналов, низкая стоимость, возможность измерения больших усилий. К недостаткам можно отнести необходимость стабилизации питающего напряжения, высокую температурную нестабильность, питание от источника переменного тока, значительная инерционность.

Магнитоупругие датчики используются для контроля усилий (например, при загрузке скипов и посадке клеток шахтных подъемных установок на кулаки), горных давлений и т.п.

На непрерывных станах холодной прокатки 1700 ОАО «Испат-Кармет» для измерения межклетьевых натяжений полосы используют магнитоанизотропные датчики усилия МАД-7681, разработанные в ОАО «Казчерметавтоматика» (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Магнитоанизотропные датчики усилия МАД-7681*

*Использованы иллюстрации из источника: <https://www.cta.ru/articles/cta/otrasli/metallurgiya/125333/>
(дата обращения: 25.07.2026).

Максимальная величина вертикальной составляющей натяжения, измеряемая датчиками МАД-7681, составляет 20 кН, нелинейность характеристик не более $\pm 0,5$ %, выходное напряжение при полном усилии на датчик равно 3 В, а выходная мощность одного датчика составляет 4 мВт, гистерезис отсутствует.

Основной деталью датчика является чувствительный элемент, представляющий собой монолитный магнитопровод из железохромоалюминиевого сплава. При отсутствии магнитной и механической анизотропии силовые линии магнитного поля, созданного первичной обмоткой, не охватывают вторичные обмотки, и ЭДС на выходе датчика равна нулю.

Когда на магнитопровод датчика действует сжимающее усилие, магнитная проницаемость в определённом направлении увеличивается, а силовые линии магнитного поля деформируются и пересекают вторичную обмотку, в результате чего устанавливается магнитная связь первичной обмотки с вторичными обмотками датчика, в которых наводится э.д.с. На выходе датчика э.д.с. будет возрастать по мере увеличения механического напряжения в магнитопроводе.

3.4 Тензорезисторные преобразователи

Тензоэффект, положенный в основу работы тензорезисторов, заключается в изменении активного сопротивления проводника (полупроводника) под действием вызываемого в нем механического напряжения и деформации. Изменение сопротивления проволоки при механическом воздействии на нее объясняется изменением геометрических размеров (длины, диаметра) и удельного сопротивления материала.

Тензочувствительные проволочные преобразователи представляют собой тонкую зигзагообразно уложенную и приклеенную к подложке проволоку. Преобразователь устанавливают таким образом, чтобы направление ожидаемой деформации совпадало с продольной осью проволочной решетки. В качестве материала для преобразователя обычно используют константовую проволоку (у константана – малый температурный коэффициент сопротивления) и для подложки – тонкую бумагу ($0,03 \div 0,05$ мм) и пленку лака либо клея (БФ-2, БФ-4, бакелитовый и др.).

На рис. 3.6 показано устройство проволочного ИПД. В приборе измерительный преобразователь – стальной цилиндр с наклеенными проволочными тензорезисторами R_T и R_K , включенными в мост, и усилитель $У$ с миллиамперметром на выходе.

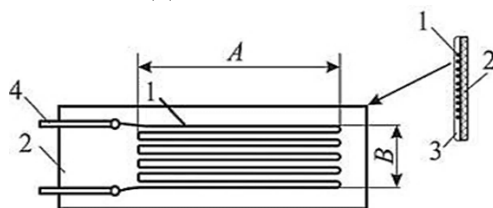


Рисунок 3.6 – Проволочный тензопреобразователь: 1 – проволока; 2 – подложка; 3 – защитная пленка; 4 – медные выводы*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Преимущества проволочных тензометрических ИПД: простота изготовления; линейная зависимость от деформации; малые размеры и цена. Основные недостатки: низкая чувствительность; влияние температуры и влажности на точность измерения; возможность применения только в сфере упругих деформаций.

Распространение получили также фольговые (рисунок 3.7), у которых вместо проволоки используется фольга, и пленочные тензорезисторы, получаемые путем возгонки тензочувствительного материала с последующим осаждением его на подложку.

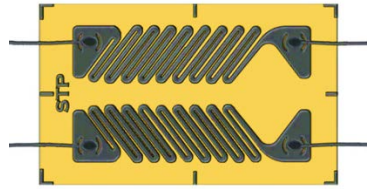


Рисунок 3.7 – Фольговый ИПД *

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

В тех случаях, когда требуется высокая чувствительность, находят применение полупроводниковые тензочувствительные преобразователи (поликристаллические из порошкообразного полупроводника и монокристаллические из кристалла кремния). Поскольку чувствительность полупроводниковых тензорезисторов в десятки раз выше, чем у металлических, и, кроме того, интегральная технология позволяет в одном кристалле кремния формировать одновременно как тензорезисторы, так и микроэлектронный блок обработки, то в последние годы получили преимущественное развитие интегральные полупроводниковые тензочувствительные преобразователи. Такие элементы реализуются либо по технологии диффузионных резисторов с изоляцией их от проводящей кремниевой подложки *p-n*-переходами – технология «кремний на кремнии», либо по гетероэпитаксиальной технологии «кремний на диэлектрике» на стеклокерамике, кварце или сапфире. Для тензочувствительных преобразователей, особенно полупроводниковых, существенно влияние температуры на их упругие и электрические характеристики, что требует применения специальных схем температурной компенсации погрешностей (в частности, с этой целью в расширенной схеме тензомоста используются компенсационные резисторы и терморезисторы). Широкое применение в изготовлении измерительных преобразователей давления в силу своих высоких механических, изолирующих и теплоустойчивых качеств получила технология КНС – «кремний на сапфире» (в частности, распространение получили датчики типа МТ-100, серий «Сапфир-22М», «Метран-22МП, -75, -150» производства российского ЗАО «Манометр», SITRANS P серии Z компании Siemens и др.).

Совершенствование технологии изготовления полупроводниковых тензорезисторов создало возможность изготавливать тензорезисторы непосредственно на кристаллическом элементе, выполненном из кремния или сапфира. Упругие элементы кристаллических материалов обладают упругими свойствами, приближающимися к идеальным. Сцепление тензорезистора с мембраной за счет молекулярных сил позволяют отказаться от использования клеящих материалов и улучшить метрологические характеристики преобразователей.

На рисунке 3.8 показана конструкция полупроводникового тензометрического ИПД: монокристаллическая сапфировая мембрана с расположенными на ней однополосковыми тензорезисторами *p*-типа с

положительной и отрицательной чувствительностями.

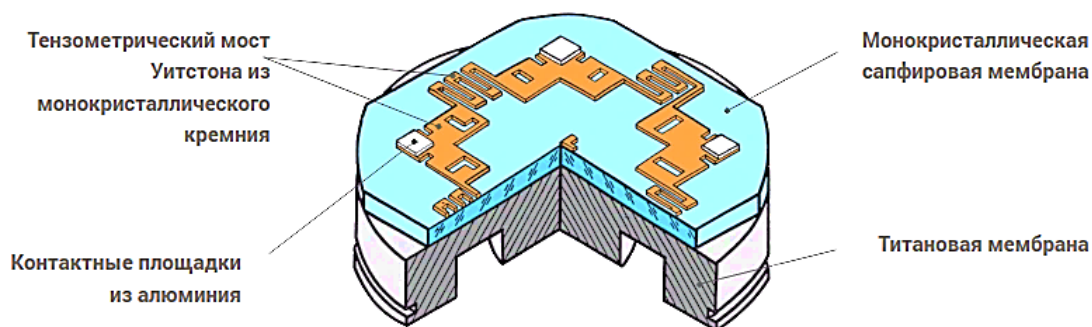


Рисунок 3.8 – Конструкция полупроводникового тензометрического ИПД*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Благодаря хорошим динамическим свойствам полупроводниковые тензорезисторные ИПД применяют для измерения быстроменяющихся давлений. Кроме того, ИПД, изготовленные на основе технологии КНС («кремний на сапфире»), имеют ряд преимуществ:

- широкий диапазон рабочих давлений от $0 \div 0,06$ до $0 \div 500$ МПа;
- широкий диапазон рабочих температур от -200 до $+200$ °С;
- высокие точностные характеристики;

– монокристаллические кремниевые тензорезисторы соединены с сапфиром на атомарном уровне (метод гетероэпитаксии) и работают практически без гистерезиса и усталостных напряжений и др.

Интеллектуальные ИПД SITRANS P (серии MKII, DS, HK) фирмы Siemens (Германия) предназначены для измерения уровня избыточного, дифференциального и абсолютного давления жидкости от 1 мбар до 4000 бар. Для решения различных задач можно воспользоваться различными преобразователями с разнообразными соединениями и насадками. Так, устройства SITRANS P (рисунок 3.9) существуют в стандартном исполнении (токовый выходной сигнал 4...20 мА), Smart (с использованием цифрового протокола HART) и с подключением к сети Profibus.



Рисунок 3.9 – Преобразователи SITRANS P серии DSIII*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

3.5 Пьезоэлектрические преобразователи

В пьезоэлектрических (сегнетоэлектрических) преобразователях используется эффект появления электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварц, турмалин, сегнетова соль и др.) под влиянием механических напряжений.

Устройство пьезоэлектрического преобразователя для измерения переменного давления газа показано на рисунке 3.10.

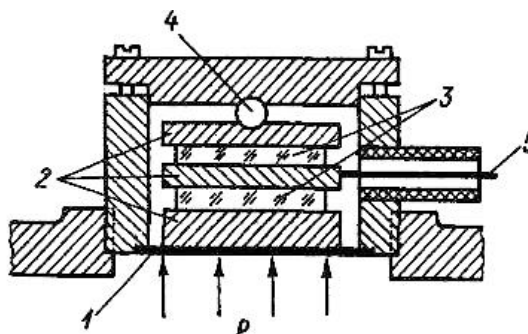


Рисунок 3.10 – Устройство пьезоэлектрического преобразователя*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Давление P через металлическую мембрану 1 передается на зажатые между металлическими прокладками 2 кварцевые пластинки 3. Шарик 4 способствует равномерному распределению давления по поверхности кварцевых пластинок. Средняя прокладка соединена с выводом 5, проходящим через втулку из хорошего изоляционного материала.

При воздействии давления P между выводом 5 и корпусом преобразователя возникает разность потенциалов

$$U = 2Q / (C_n + C_0) = 2k \cdot S \cdot P / (C_n + C_0),$$

где Q – заряд, возникающий на пластинке кварца;

C_n – емкость преобразователя;

C_0 – емкость проводов и входной цепи прибора, измеряющего разность потенциалов;

k – пьезоэлектрический модуль кварца;

S – площадь поверхности мембраны, подверженная давлению.

По разности потенциалов U судят о значении давления P .

В пьезоэлектрических преобразователях главным образом применяют кварц, у которого пьезоэлектрические свойства сочетаются с высокой механической прочностью и высокими изоляционными качествами, а также с независимостью пьезоэлектрической характеристики от температуры в широких пределах. Используют также поляризованную керамику из титаната бария, титаната и цирконата свинца. Искусственные пьезоматериалы

(пьезокерамики) получают спеканием смеси порошков (оксидов полупроводников) при температуре выше точки Кюри с последующим постепенным остыванием и выдержкой при определенной температуре (до 200 °С) в течение нескольких часов при высокой напряженности электрического поля (более 10^6 В/м). В таких условиях происходит поляризация керамики. При нагревании выше точки Кюри пьезоэффект исчезает.

Основные преимущества пьезоэлектрических ИПД:

- быстрое время отклика (микросекунды);
- относительная простота конструкции и невысокие массогабаритные показатели;
- возможность измерений малых изменений давления при значительном уровне статического давления;
- значительный диапазон рабочих температур от -196 °С до $+399$ °С;
- высокая надежность и хорошая линейность в широком диапазоне амплитуд;
- невысокая стоимость.

К недостаткам относят: невысокую чувствительность, непригодность к измерению статических величин, необходимость высокого входного сопротивления измерительной цепи, относительно невысокий уровень выходного сигнала.

Пьезоэлектрические датчики обычно применяют для измерений быстропротекающих процессов при ударных нагрузках, вибрациях, переменных усилиях и т.д. Они могут использоваться для различных измерений динамического давления: сжатие, пульсация, кавитация, гидравлические и пневматические колебания давления, звуки высокой интенсивности, взрывной волны, тестирование взрывных компонентов (детонаторов) и др.

На рисунке 3.11 представлен пьезоэлектрический датчик давления РТ124В-210 китайской компании ZHYQ. Датчик рассчитан на диапазон измерения от 0 до 6000 бар, время отклика – менее 5 мсек, выходной сигнал – $4 \div 20$ мА, $0 \div 10$ В либо $0 \div 5$ В.



Рисунок 3.11 – Пьезоэлектрический датчик давления РТ124В-210*

*Использована иллюстрация из источника: Эм Г.А. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.

Список рекомендуемой литературы

1. Датчики и измерительные преобразователи. Часть 1: учебное пособие / Г. А. Эм, В. В. Каверин, В. А. Иванов; Карагандинский технический университет. – Караганда: Изд-во КарТУ, 2020. – 72 с.
2. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
3. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник / Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.
4. Эм Г.А. Элементы и устройства автоматики: Учеб. пособие. – Караганда: КарГТУ, 2009 – 150 с..