

Э. Ю. Замалетдинова, А. И. Егорычев

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Ключевые слова: датчики давления, методы измерения давления.

В статье рассматривается понятие датчиков давления, методы измерения давления. Проводится сравнительный анализ методов измерения давления, перечислены достоинства и недостатки методов.

Key words: pressure sensor, methods for measuring pressure.

The article discusses the concept of pressure sensors, pressure measurement methods. A comparative analysis of methods for measuring pressure, these advantages and disadvantages.

Измерение давления необходимо для управления технологическими процессами и обеспечения безопасности производства. Кроме того, этот параметр используется при косвенных измерениях других технологических параметров: уровня, расхода, температуры, плотности и т.д.

Датчик давления — устройство, физические параметры которого изменяются в зависимости от давления измеряемой среды (жидкости, газы, пар). В датчиках давление измеряемой среды преобразуется в унифицированный пневматический, электрический сигналы или цифровой код.

Датчик давления состоит из первичного преобразователя давления, в составе которого чувствительный элемент - приемник давления, схемы вторичной обработки сигнала, различных по конструкции корпусных деталей, в том числе для герметичного соединения датчика с объектом и защиты от внешних воздействий и устройства вывода информационного сигнала.

Основными отличиями одних приборов от других являются пределы измерений, динамические и частотные диапазоны, точность регистрации давления, допустимые условия эксплуатации, массогабаритные характеристики, которые зависят от принципа преобразования давления в электрический сигнал [1].

Существует несколько методов измерения давления:

- **Тензометрический метод.** Чувствительные элементы датчиков базируются на принципе изменения сопротивления при деформации тензорезисторов, приклеенных к упругому элементу, который деформируется под действием давления.

- **Ёмкостной метод.** Ёмкостные преобразователи используют метод изменения ёмкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками.

- **Резонансный метод.** В основе метода лежит изменение резонансной частоты колеблющегося упругого элемента при деформировании его силой или давлением.

- **Индуктивный метод.** Основан на регистрации вихревых токах Фуко. Чувствительный элемент состоит из двух катушек, изолированных между собой металлическим экраном.

- **Ионизационный метод.** В основе лежит принцип регистрации потока ионизированных частиц.

- **Пьезоэлектрический метод.** В основе лежит прямой пьезоэлектрический эффект, при котором пьезоэлемент генерирует электрический сигнал, пропорциональный действующей на него силе или давлению [2]. Рассмотрим каждый метод

Тензометрический метод

В настоящее время основная масса датчиков давления в нашей стране выпускаются на основе чувствительных, принципом которых является измерение деформации тензорезисторов, сформированных в эпитаксиальной пленке кремния на подложке из сапфира (КНС), припаянной твердым припоем к титановой мембране. Иногда вместо кремниевых тензорезисторов используют металлические: медные, никелевые, железные и др.

Принцип действия тензопреобразователей основан на явлении тензоэффекта в материалах. Чувствительным элементом служит мембрана с тензорезисторами, соединенными в мостовую схему. Под действием давления измеряемой среды мембрана прогибается, тензорезисторы меняют свое сопротивление, что приводит к разбалансу моста Уитстона. Разбаланс линейно зависит от степени деформации резисторов и, следовательно, от приложенного давления.

Следует отметить принципиальное ограничение КНС преобразователя — неустранимую временную нестабильность градуировочной характеристики и существенные гистерезисные эффекты от давления и температуры. Это обусловлено неоднородностью конструкции и жесткой связью мембраны с конструктивными элементами датчика. Поэтому, выбирая преобразователь на основе КНС, необходимо обратить внимание на величину основной погрешности с учетом гистерезиса и величину дополнительной погрешности.

К преимуществам можно отнести хорошую защищенность чувствительного элемента от воздействия любой агрессивной среды, налаженное серийное производство, низкую стоимость.

Пьезорезистивный метод

Практически все производители датчиков в России проявляют живой интерес к использованию интегральных чувствительных элементов на основе монокристаллического кремния. Это обусловлено тем, что кремниевые преобразователи имеют на порядок большую временную и температурную ста-

бильности по сравнению с приборами на основе КНС структур.

Кремниевый интегральный преобразователь давления представляет собой мембрану из монокристаллического кремния с диффузионными пьезорезисторами, подключенными в мост Уинстона.

Чувствительным элементом служит кристалл ИПД, установленный на диэлектрическое основание с использованием легкоплавкого стекла или методом анодного сращивания.

Для измерения давления чистых неагрессивных сред применяются, так называемый, Low cost, основанные на использовании чувствительных элементов либо без защиты, либо с силиконовым гелем.

Для измерения агрессивных сред и большинства промышленных применений применяется преобразователь давления в герметичном металло-стеклянном корпусе, с разделительной диафрагмой из нержавеющей стали, передающей давление измеряемой среды на ИПД посредством кремнийорганической жидкости. Преобразователь давления защищенный от измеряемой среды посредством коррозионно – стойкой мембраны.

Основным преимуществом пьезорезистивных датчиков является более высокая стабильность характеристик, по сравнению с КНС преобразователями. ИПД на основе монокристаллического кремния устойчивы к воздействию ударных и знакопеременных нагрузок. Если не происходит механического разрушения чувствительного элемента, то после снятия нагрузки он возвращается к первоначальному состоянию, что объясняется использованием идеально-упругого материала [3].

Ёмкостной метод

Ёмкостные преобразователи используют метод изменения емкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. Известны керамические или кремниевые ёмкостные первичные преобразователи давления и преобразователи, выполненные с использованием упругой металлической мембраны. При изменении давления мембрана с электродом деформируется и происходит изменение емкости.

В элементе из керамики или кремния, пространство между обкладками обычно заполнено маслом или другой органической жидкостью

При использовании металлической диафрагмы ячейка делится на две части, с одной стороны которой расположены электроды. Электроды с диафрагмой образуют две переменные емкости, включенные в плечи измерительного моста. Когда давление по обеим сторонам одинаково, мост сбалансирован. Изменение давления в одной из камер приводит к деформации мембраны, что изменяет емкости, разбалансируя мост.

В настоящее время сенсоры изготавливаются с электродами, расположенными с одной стороны от диафрагмы. Газ будет контактировать только с камерой, выполненной из нержавеющей стали или инконеля. Это позволяет проводить измерения давления загрязненных, агрессивных, радиоактивных

газов и смесей неизвестного состава. В абсолютной модели опорное давление составляет $10^{-7} - 10^{-8}$ мм рт. ст., которое поддерживается в течение длительного времени химическим геттером.

Достоинством чувствительного ёмкостного элемента является простота конструкции, высокая точность и временная стабильности, возможность измерять низкие давления и слабый вакуум. К недостатку – нелинейную зависимость емкости от приложенного давления [4].

Резонансный метод

Резонансный принцип используется в датчиках давления на основе вибрирующего цилиндра, струнных датчиках, кварцевых датчиках, резонансных датчиках на кремнии. В основе метода лежат волновые процессы: акустические или электромагнитные. Это и объясняет высокую стабильность датчиков и высокие выходные характеристики прибора.

Частным примером может служить кварцевый резонатор. При прогибе мембраны, происходит деформация кристалла кварца, подключенного в электрическую схему и его поляризация. В результате изменения давления частота колебаний кристалла меняется. Подбрав параметры резонансного контура, изменяя емкость конденсатора или индуктивность катушки, можно добиться того, что сопротивление кварца падает до нуля – частоты колебаний электрического сигнала и кристалла совпадают – наступает резонанс.

Преимуществом резонансных датчиков является высокая точность и стабильность характеристик, которая зависит от качества используемого материала.

К недостаткам можно отнести индивидуальную характеристику преобразования давления, значительное время отклика, не возможность проводить измерения в агрессивных средах без потери точности показаний прибора.

Индуктивный метод

Индукционный способ основан на регистрации вихревых токов (токов Фуко). Токи Фуко возникают под воздействием переменного электромагнитного поля и по физической природе ничем не отличаются от индукционных токов, возникающих в линейных проводниках. Они вихревые, то есть замкнуты в кольцо. Электрическое сопротивление массивного проводника мало, поэтому токи Фуко достигают очень большой силы [5].

Чувствительный элемент состоит из двух катушек, изолированных между собой металлическим экраном. Преобразователь измеряет смещение мембраны при отсутствии механического контакта. В катушках генерируется электрический сигнал переменного тока таким образом, что заряд и разряд катушек происходит через одинаковые промежутки времени. При отклонении мембраны создается ток в фиксированной основной катушке, что приводит к изменению индуктивности системы. Смещение характеристик основной катушки дает возможность преобразовать давление в стандартизованный сиг-

нал, по своим параметрам прямо пропорциональный приложенному давлению.

Преимуществом такой системы, является возможность измерения низких избыточных и дифференциальных давлений, достаточно высокая точность и незначительная температурная зависимость. Однако датчик чувствителен к магнитным воздействиям, что объясняется наличием катушек, которые при прохождении переменного сигнала создают магнитное поле.

Ионизационный метод

В основе лежит принцип регистрации потока ионизированных частиц. Аналогом являются ламповые диоды,

Лампа оснащена двумя электродами: катодом и анодом, - а также нагревателем. В некоторых лампах нагреватель отсутствует, что связано с использованием более совершенных материалов для электродов. Корпус лампы выполнен из высококачественного стекла.

Преимуществом таких ламп является возможность регистрировать низкое давление – вплоть до глубокого вакуума с высокой точностью. Однако следует строго учитывать, что подобные приборы нельзя эксплуатировать, если давление в камере близко к атмосферному. Поэтому подобные преобразователи необходимо сочетать с другими датчиками давления, например, емкостными. Помимо прочего, ионизационные лампы должны оснащаться дополнительными приборами, поскольку зависимость сигнала от давления является логарифмической.

Достоинства и недостатки типов преобразователей

Достоинства	Недостатки
Тензометрический (КНС – преобразователи)	
Высокая степень защиты от агрессивной среды Высокий предел рабочей температуры Налажено серийное производство Низкая стоимость	Неустраняемая нестабильность градуировочной характеристики Высокие гистерезисные эффекты Низкая устойчивость при воздействии ударных нагрузок и вибрации
Пьезорезистивный (на монокристаллическом кремнии)	
Высокая стабильность характеристик Устойчивость к ударным нагрузкам Низкие (практически отсутствуют) гистерезисные эффекты Высокая точность Возможность измерять давления различных агрессивных сред	Ограничение по температуре (до 150 градусов по Цельсию)

Ёмкостной	
Высокая точность Высокая стабильность характеристик Возможность измерять низкий вакуум Простота конструкции	Зачастую, нелинейная зависимость емкости от приложенного давления Необходимо дополнительное оборудование или электрическая схема для преобразования емкостной зависимости в один из стандартных выходных сигналов
Резонансный	
Высокая стабильность характеристик Высокая точность измерения давления	При измерении давления агрессивных сред необходимо защитить чувствительный элемент, что приводит к потере точности измерения Высокая цена Длительное время отклика Индивидуальная характеристика преобразования давления в электрический сигнал
Индукционный	
Возможность измерять дифференциальные давления с высокой точностью Незначительное влияние температуры на точность измерения	Сильное влияние магнитного поля Чувствительность к вибрациям и ударам
Ионизационный	
Возможность измерения высокого вакуума Высокая точность Стабильность выходных параметров	Нельзя использовать подобные приборы при высоком давлении (низкий вакуум является порогом) Нелинейная зависимость выходного сигнала от приложенного давления Высокая хрупкость Необходимо сочетать с другими датчиками давления

Различные сферы применений определяют свои требования к датчикам: для промышленности - надежность и стабильность характеристик, для лабораторных измерений и расходомерии – точность измерения давления и т.д.

Еще одним важным параметром является цена датчиков, которые используют тот или иной принцип преобразования давления. Поэтому при выборе преобразователя необходимо определить наиболее выгодный вариант – соотношение цены к возможностям прибора. Очевидно там, где требуется только какой-либо определенный параметр датчика (например, точность или возможность измерять вакуум) соотношение цены к предъявляемым

требованиям высокое. В основном это касается резонансных, индукционных, емкостных и ионизационных датчиков.

В большинстве случаев требуется несколько параметров преобразователей: точность, стабильность выходных характеристик, надежность, долговечность, низкая цена. Таким требованиям, как видно из вышеприведенной таблицы, удовлетворяют пьезорезистивные датчики давления и КНС - преобразователи.

Выбрав КНС - преобразователи, вы получите надежные датчики работающие при высоких температурах (более 1500С), однако теряете в точности и стабильности выходных характеристик, по сравнению с преобразователями на монокристаллическом кремнии. Поскольку в основном требуется высокая стабильность выходных характеристик при невысоких температурах, то интегральные преобразователи

давления являются в этом случае оптимальным решением, при невысокой цене.

Литература

1. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология, сертификация. – М.: Юрайт, 2003.
2. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение.-С.-Пб., изд-во СПбГТУ, 1999
3. *Фафурин А.В.*, Пульсация параметров энергоустановок как средство управления и экономики/ А. Ф. Фафурин, Я.З. Гузельбаев//Вестник Казанского технологического университета-2014.-№14. с. 256-259
4. Замалетдинова Э.Ю., Ягьяева Л.Т., Замалетдинов Р.Р. Имитационный метод поверки ультразвуковых расходомеров./ Замалетдинова Э.Ю., Ягьяева Л.Т., Замалетдинов Р.Р. //Вестник Казанского технологического университета-2011.-№19. с. 214-218
5. Википедия: [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Вихревые токи](http://ru.wikipedia.org/wiki/Вихревые_токи)

© Э. Ю. Замалетдинова – ст. препод. каф. автоматизированных систем сбора и обработки информации КНИТУ, zamaletdinowa@mail.ru; А. И. Егорычев – магистр той же кафедры.