

Датчики давления: принципы работы и опыт эксплуатации

Технологии, учет и безопасность производства накладывают особые требования на измерения в технологических процессах, где рабочие среды находятся под давлением (разрежением). Это связано с тем обстоятельством, что без измерения давления рабочих сред невозможно ни построить безопасный технологический процесс, ни определить плотность циркулирующих веществ, ни обеспечить правильный учет выпущенной продукции, будь то сжиженный газ или тепловая энергия.

История развития датчиков давления прошла путь от простейших ртутных измерителей величины атмосферного давления до современных многопараметрических микропроцессорных датчиков дифференциального давления/разрежения, обеспечивающих организацию измерений и защит в технологических процессах сразу по нескольким параметрам.

Существующие сегодня датчики давления по принципу измерения можно разделить на основные группы:

- жидкостные датчики давления прямого измерения;
- жидкостные датчики дифференциального давления прямого измерения;
- механические датчики давления прямого измерения;
- механические датчики дифференциального давления прямого измерения;
- тензорезистивные датчики давления косвенного измерения;
- тензорезистивные датчики дифференциального давления косвенного измерения;
- емкостно-частотные датчики давления косвенного измерения;
- емкостно-частотные датчики дифференциального давления косвенного измерения;
- кремниевые-резонансные датчики давления косвенного измерения;
- кремниевые-резонансные датчики дифференциального давления косвенного измерения.

По принципу отображения информации их можно разделить на прямопока-

зывающие датчики давления и не прямопоказывающие.

ЖИДКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ: ОПЫТ СОЗДАНИЯ

Одними из первых появились жидкостные датчики давления прямого действия, использующие принцип измерения высоты столба жидкости в закрытом с одного конца сосуде (стеклянной трубке) в зависимости от давления среды, прилагаемого с другой стороны трубки. Существовало мнение, что вакуумный насос может поднять столб жидкости на любую высоту. Оказалось, что это не так. Ртуть, налитая в стеклянную трубку длиной 1 м, при погружении второго конца этой трубки в сосуд с ртутью опустилась на отметку 760 мм. Однако вскоре было замечено, что при изменении атмосферного давления высота столба ртути колебалась между отметками 740–780 мм без внешнего воздействия экспериментатора. Так родился первый ртутный манометр, а величина атмосферного давления была принята равной 760 мм ртутного столба на уровне моря.

Следующий эксперимент был поставлен в Италии, где вакуумным насосом пытались поднять столб воды на высоту 25 м. Однако он поднялся только на высоту 10,33 м, и никакие усилия не позволяли ему подняться выше, пока в нижний патрубок не было подано дополнительное давление от насоса нагнетания. Так родились два первых датчика – давления и дифференциального давления –

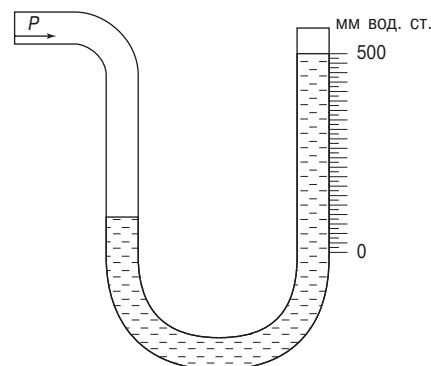


Рис. 1. Промышленный водяной манометр

и две шкалы – мм ртутного столба и мм водяного столба. При переходе к метрической системе измерений – международной системе СИ – не очень удобные шкалы бытовых наглядных измерений мм ртутного столба и мм водяного столба были вначале заменены на технические рациональные единицы кгс/м², кгс/см² и далее на системные единицы Па (1 Па = 9,80665 Н/м²), кПа и МПа. При этом имеет место следующий пересчет единиц: 1 мм водяного столба = 1 кгс/м² = 9,80665 Па.

Обобщенные технические характеристики наиболее известных жидкостных датчиков дифференциального давления/разрежения (рис. 1) приведены в табл. 1.

Стеклянные жидкостные датчики дифференциального давления/разрежения обладают неоспоримыми преимуществами – очень малой стоимостью и наглядностью показаний. Но данные приборы, к сожалению, практически невозможно подключить к системам АСУ ТП. Их использование в системах защит и сигнализации весьма проблематично, точность измерений невысока. В связи с этим приборы данного типа чаще всего используются в качестве индикаторов на небольших котельных и вспомогательных производствах предприятий для индикации небольших давлений/разрежений в топках, технологических процессах, сливных коллекторах, слабонапорных трубопроводах.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ (ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ) ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ

Принцип действия механических датчиков давления (дифференциального

Таблица 1

Наименование/характеристики	U-образные	Чашечные	С наклонной трубкой	Мак Леода
Избыточное давление/разрежение, мм вод. ст.	±1 000	+1...500	+10...150	-10...+100
Абсолютная погрешность, мм вод. ст.	±1	±1	±0,5	±0,25

давления) основан на использовании давления измеряемой среды для упругой механической деформации эталонного механического органа и использовании результатов упругой деформации для индикации величины давления путем перемещения связанной с рабочим органом стрелки по шкале прибора. Наиболее простыми приборами были пружинные стрелочные манометры (рис. 2), позволяющие использовать жесткость пружины для пропорционального перемещения стрелки по шкале прибора. Более современные приборы в качестве механически деформируемого рабочего органа используют стальные или титановые мембраны, пружины Бурдона, винтовые пружины, связанные системой механической передачи с поворотной стрелкой, расположенной на круглом циферблате манометра или дифференциального манометра (рис. 3).

вещества в импульсных линиях передавать запрещалось. Методы применения разделительных мембран с заполнением импульсных линий нейтральными жидкостями и газами также не позволяли решить все проблемы измерения давления. Кроме того, длинные импульсные линии с обогревом, разделительные мембраны и др. настолько увеличивали стоимость и снижали надежность систем контроля, защит и автоматики, что встал вопрос о принципиальном изменении методов измерения давления и дифференциального давления в технологических установках.

Электроника тех лет (эра ламповой техники) еще не позволяла разработать недорогие электронные устройства измерения. Выходом из ситуации стало создание индукционных датчиков давления и дифференциального давления. Суть данного метода измерений состоит

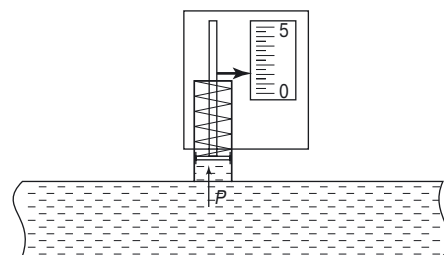


Рис. 2. Пружинный датчик давления

ные датчики ДМ и ДМЭР, работающие и сегодня. С их достоинствами мы уже познакомились. Их недостатки проявили себя сразу – это довольно значительный дрейф нуля и меньшая точность по сравнению с прямопоказывающими приборами.

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ (ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ)

С изобретением тензорезистора (это тонкопленочный резистор на сапфировой подложке, сопротивление которого изменяется от величины приложенного усилия деформации подложки) настала эра тензометрических датчиков давления. Тензорезистивные датчики давления и дифференциального давления используют ранее отработанную конструкцию механической мембраны с установленным на ней чувствительным элементом – тензорезистором (рис. 4). Он включен в диагональ измерительного моста. Напряжение разбаланса с диагонали моста усиливается высокоточным дифференциальным усилителем и в виде унифицированного токового сигнала поступает на выход датчика. Промышленностью предприятий стран СНГ и зарубежья освоен выпуск датчиков давления, разрежения на диапазоны давлений до 160 МПа с приведенной погрешностью измерения до 0,1 % и дифференциального давления на диапазоны перепада давлений от 0,04 до 630 кПа с приведенной погрешностью измерения до 0,075 %. Около 20 лет назад фирма

Таблица 2

Наименование/характеристики	МТИ, ВТИ, МКУ	МП2У, МП3У, МП4У	МТ01-63, МТ01-100, МТ01-150	МТП1М, МП 3, МП 4, МП100
Производитель (разработчик)	«Манометр», Россия	«Монотомь», Россия	PREMATLAK, Словакия	«Поинт», Беларусь
Избыточное давление, МПа	0–160	0–60	0–100	0,05–20
Стоимость с НДС, тыс. руб.	190	45	30	11...150
Класс точности	1,5 (0,6)	1,5 (0,6)	1,5	1,5

Таблица 3

Наименование/характеристики	Сапфир 22 ДИМТ (МП)	Метран 150СJ	STG-94L	3051СJ	МИДА-ДИ-51П
Производитель (разработчик)	«Манометр», Россия	«Метран», Россия	Honeywell, США	Emerson PM, Нидерланды – США	«Поинт», Беларусь
Избыточное давление, МПа	0–100	0–100	0–120	0–100	0–160
Стоимость с НДС, млн руб.	0,93	3,0	2,83	6,5	0,27
Приведенная погрешность	±0,2 %	±0,075 %	±0,1 %	±0,065 %	±0,2 %

Метрологические характеристики наиболее известных датчиков, реализующих данный метод измерения давления (перепад давления), приведены в табл. 2.

ИНДУКЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ (ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ)

Недостатком механических датчиков давления была необходимость привязки датчика к месту отбора импульса давления. Так, для отображения информации на щитах управления необходимо было прокладывать импульсные линии от точек отбора к операторской, что не всегда было возможно. Появлялись ограничения как по длине импульсных линий (при большой длине линий возникали погрешности передачи импульсов давления), так и по составу рабочих сред. Ядовитые, радиоактивные и взрывоопасные

в следующем. С мембраной, воспринимающей давление среды посредством механических устройств, связан дифференциальный трансформатор, перемещение одной из катушек которого вызывает эквивалентное изменение напряжения на выходе трансформатора. Второй подход был основан на использовании принципа сельсинов, где поворот вала сельсина датчика приводил к эквивалентному повороту вала сельсина приемника. Оба метода позволяли разместить первичный датчик во взрывоопасной или ядовитой зоне, а передачу информации о результатах измерений осуществить при помощи электрических кабелей. Данное решение позволило снять ограничения на дальность размещения датчиков и состав измеряемых сред, а также открыло возможность использования результатов измерения в первых АСУ ТП.

Типичными представителями датчиков давления и дифференциального давления данного класса были всем извест-

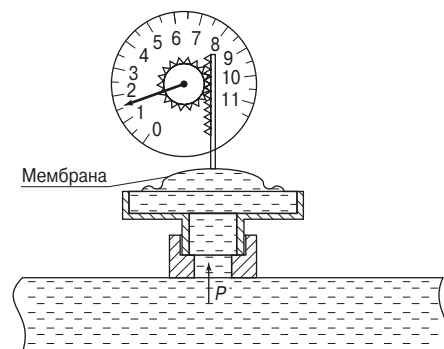


Рис. 3. Мембранный датчик давления

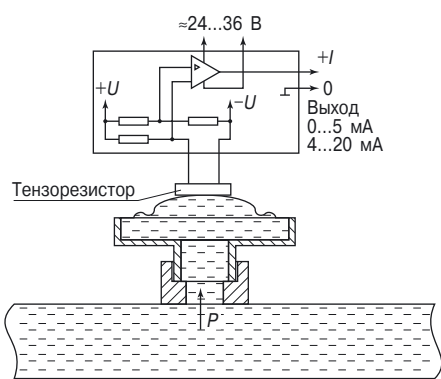


Рис. 4. Тензометрический датчик давления

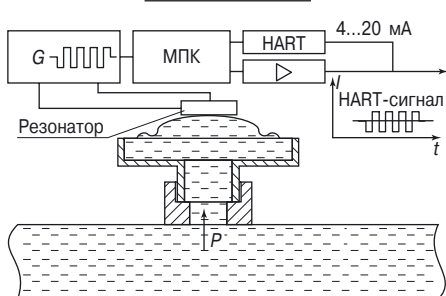


Рис. 5. Датчик давления на кремниевом резонаторе

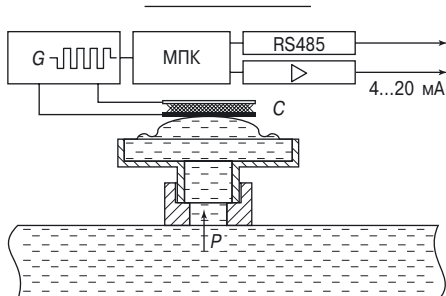


Рис. 6. Емкостный датчик давления

Emerson начала оснащать свои датчики цифровым протоколом передачи данных HART. Суть метода в том, что на токовый сигнал при помощи специального устройства накладывается кодированный цифровой сигнал (рис. 5), передаваемый по линии передачи токового сигнала в виде пульсаций тока в выходной линии. Однако помехоустойчивость такой связи оказалась весьма низкой, и датчики с протоколом HART использовались в основном на объектах с низким уровнем помех.

Технические характеристики и стоимость наиболее часто применяемых тензометрических датчиков давления/ разрежения приведены в табл. 3, а тензометрических датчиков дифференциального давления – в табл. 4.

Преимуществами данных типов датчиков стала более высокая точность измерений по сравнению с механическими и индукционными датчиками, наличие

унифицированного токового выхода, более высокая надежность. Недостатки тензометрических датчиков давления связаны с механической усталостью тензорезисторов, надежность которых оказалась ниже надежности самих механических мембран, на которых они расположены. Кроме того, тензорезисторы требуют определенных температурных условий для своей работы, что не всегда выполнимо в условиях эксплуатации.

ЧАСТОТНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ (ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ)

Недостатки тензорезистивных датчиков, а также требование повышения точности измерений привели к разработке нового класса датчиков давления – частотных. Лидерами в данном направлении приборостроения выступили две фирмы – европейская АВВ и японская «Якогава».

Фирмой «Якогава» разработаны частотные датчики с кремниевыми резонаторами (наподобие кварцевых резонаторов). Сам кремниевый резонатор (рис. 5) располагается на механической измерительной мембране, упругие деформации которой приводят к изменению его параметров и, соответственно, к изменению генерируемой частоты. Это значение измеряется микропроцессорным контроллером (МПК), обеспечивающим выдачу результатов измерений в виде унифицированного токового сигнала на выход датчика. Данному типу

датчиков присущи те же недостатки, что и тензорезистивным датчикам, – размещение резонатора на мембране и возможность его усталостного разрушения в процессе эксплуатации. Приведенная погрешность серийных датчиков составляет 0,075 %, а изготовленных по спецзаказу – 0,04 %. Стоимость таких датчиков, по сравнению с датчиками фирмы Emerson, вдвое ниже.

Фирмой АВВ разработаны частотные датчики, принцип работы которых основан на измерении частоты генерации колебаний резонансным генератором. Измерительная мембрана (рис. 6) совместно с неподвижной пластиной образуют конденсатор, емкость которого изменяется в зависимости от положения мембраны, которое, в свою очередь, зависит от давления, прилагаемого со стороны рабочей среды. Данный конденсатор подключен к резонансному генератору G, частота колебаний которого пропорциональна емкости конденсатора. Микропроцессорный контроллер МПК выполняет обработку результатов измерения и обеспечивает выдачу данных по двум независимым выходам – RS485 и 4–20 мА. При этом выход RS485 можно запрограммировать под любой стандартный интерфейс – Modbus, Profibus, Multibus и др. Применение данного технического решения позволило снизить приведенную погрешность серийных датчиков дифференциального давления до 0,04 % при стоимости однако датчика 3,6 млн руб. (для сравнения: стоимость тензометрических датчиков дифференциального давления фирмы Emerson со-

Таблица 4

Наименование/ характеристики	Сапфир 22ДД МТ (МП)	Метран 150CD	STD-924	3051CD	Поинт-Сапфир 22 ДД МТ (МП)
Производитель (разработчик)	«Манометр», Россия	«Метран», Россия	Honeywell, США	Emerson PM, Нидерланды – США	«Поинт», Беларусь
Шкалы перепада давления, кПа	0,16–630	0,16–630	0,14–630	0,16–630	0,16–630
Стоимость с НДС, млн руб.	1,67 (1,97)	4,2	3,34	7,65	0,58 (0,9)
Относительная погрешность	±0,2 %	±0,075 %	±0,075 %	±0,065 %	±0,25 %

Таблица 5

Наименование/ характеристики	Модель 261GS	EJA530A
Производитель (разработчик)	ABB, Германия	Yokogawa, Япония
Избыточное давление, кПа	±0,3...60 000	±0...60 000
Стоимость с НДС, млн руб.	2,14	2,54
Приведенная погрешность	±0,1 %	±0,075 %

Таблица 6

Наименование/ характеристики	Модель 265DS	EJA110A	STD-120
Производитель (разработчик)	ABB, Германия	Yokogawa, Япония	Honeywell, США
Шкалы перепада давления, кПа	0,14–630	0,16–630	0,14–100
Стоимость с НДС, млн руб.	3,6	3,78	4,92
Относительная погрешность	±0,04 %	±0,75 % (±0,04 % по спецзаказу)	±0,0375 %

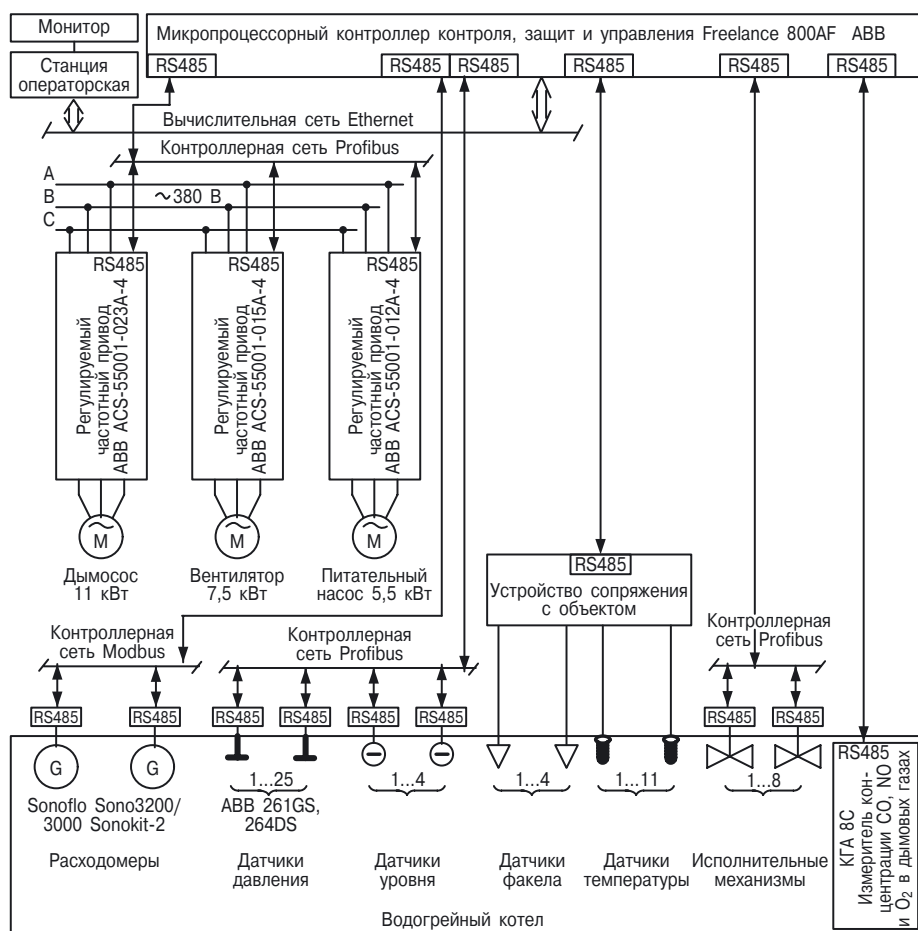


Рис. 7. Структурная схема мультипроцессорной АСУ ТП водогрейных котлов

Технические характеристики наиболее часто применяемых частотных датчиков дифференциального давления приведены в табл. 6.

Наличие стандартных интерфейсов на основе протокола RS485 делает датчики более универсальными и перспективными для разработчиков систем по сравнению с устаревшим протоколом HART. В настоящее время большинство перспективных высокоточных расходомеров (Sonoflo/Sono 3200/3000 Sonokit-2, PCBY 1400), концентратомеров (Ultramat 23-Siemens, Uras14 – ABB), контроллеров (Modicon, Freelance 800), задвижек (ЗЭиМ, Чебоксары) и др. оснащаются интерфейсами Modbus, Profibus, Multibus по протоколу RS485, что позволяет строить системы контроля, защит и управления, а также высокоточные измерительные системы коммерческого учета без промежуточных звеньев – устройств сопряжения с объектом. В этом случае создаются мультисистемные многопроцессорные распределенные АСУ ТП, позволяющие при дублировании (троировании) датчиков строить на одном и том же комплекте оборудования высоконадежные системы контроля, защит и управления (рис. 7). Данное решение кроме повышения точности, надежности и быстродействия позволяет значительно снизить стоимость систем за счет исключения лишних промежуточных звеньев сбора информации и управления исполнительными механизмами.

ставляет 7,65 млн руб. при приведенной погрешности 0,065 %). Кроме того, эксплуатационная надежность емкостных частотных датчиков стала значительно выше по сравнению с тензометрическими, что имеет первостепенное значение

при их применении в системах защит опасных производств.

Технические характеристики выпускаемых промышленностью частотных датчиков давления/разрежения приведены в табл. 5.

Дмитрий ТРОСНИКОВ,
заместитель директора
ООО «Энергопромис»,
Владимир ЖУК,
кандидат технических
наук, ведущий инженер
ООО «Энергопромис»