



ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ И ДАТЧИКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НОВОЙ СЕРИИ DPharp EJX

В.Кравченко, Т.Шикава, Т. Одохира, М.Никкуни,
Е.Кояма, Т.Цумагари, Р.Асада

Недавно была выполнена разработка датчиков давления и датчиков дифференциального давления серии DPharp EJX с усовершенствованным кремниевым резонансным чувствительным элементом. В датчиках серии DPharp EJX реализуется технология мультисенсорности, позволяющая одновременно измерять дифференциальное и статическое давление. Эта технология исключает необходимость использования дополнительных датчиков давления, что способствует уменьшению затрат при вводе в действие производственной установки. Кроме того, кремниевый резонансный чувствительный элемент, обладающий долговременной стабильностью, позволяет улучшить качество и надежность работы, что уже было продемонстрировано проверенными на производстве приборами серии EJA.

Использование новейших технологий обеспечило для этих интеллектуальных датчиков дифференциального давления достижение минимального времени отклика и компактность конструкции. Удобный для пользователя многофункциональный ЖК-дисплей, расширенная функция самодиагностики и удобство эксплуатации обеспечивают пользователю максимальную эффективность работы.

Приборы серии DPharp EJX представлены широким разнообразием моделей, включая датчики избыточного давления и датчики дифференциального давления с выносными разделительными мембранами, датчики избыточного давления ввертного типа и многопараметрические датчики дифференциального и абсолютного давления с функциями вычисления расхода. Кроме того, они соответствуют различным стандартам, включая стандарты пожаробезопасного, взрывобезопасного и искробезопасного исполнения, нормы техники безопасности SIL и директивы ЕС. Приборы этой серии также совместимы с протоколами связи HART и FOUNDATION fieldbus.

Благодаря гибкости и универсальности модельного ряда и расширенной функциональности, приборы серии EJX располагают широкими возможностями, отвечающими требованиям разностороннего применения, внося в результате существенный вклад в минимизацию для заказчика величины полной стоимости владения (ТСО).

ВВЕДЕНИЕ

После выпуска в 1991 году приборов серии DPharp EJ, а в 1994 году приборов серии DPharp EJA во всем мире используется около 1,2 миллиона этих датчиков.

Недавно компанией YOKOGAWA на базе кремниевого резонансного чувствительного элемента (сенсора) были разработаны также датчики серии EJX, являющиеся еще более компактными, легкими и усовершенствованными приборами, реализующими функцию мультисенсорности.

На рисунке 1 показан внешний вид прибора серии EJA (слева) и прибора серии EJX (справа).



Рис. 1. Внешний вид прибора серии EJA (слева) и серии EJX (справа)

ВОЗМОЖНОСТИ

Мультисенсорность

Датчики дифференциального давления измеряют перепад давления между сторонами высокого и низкого давления. Однако, при измерении расхода часто

необходимо также измерять давление на стороне высокого давления (в дальнейшем изложении называется статическим давлением), например, для того, чтобы выполнить коррекцию по плотности потока жидкости.

Датчики дифференциального давления давления серии EJX могут выполнять считывание значений статического давления, обеспечивая решение двух задач (измерения дифференциального и статического давления) с использованием одного прибора. Прибор также можно легко сконфигурировать так, чтобы в качестве статического давления он регистрировал давление на стороне низкого давления. В результате при измерении уровня в резервуаре можно также с помощью того же датчика измерять внутреннее давление в резервуаре.

Кремниевый резонансный сенсор, встроенный в прибор серии DPharp, имеет два резонатора (формируемых с использованием технологии MEMS), расположенных на кремниевой мембране так, что в одном из них при приложении дифференциального давления происходит деформация растяжения, а в другом - деформация сжатия. Резонансные частоты этих резонаторов можно представить следующим уравнением:

$$f = \frac{4,73^2 h}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho} \left\{ 1 + 0,2366 \left(\frac{l^2}{h} \right) \varepsilon \right\}},$$

где

$\varepsilon = \varepsilon_0 \pm \varepsilon_{dp} + \varepsilon_{sp}$

f - резонансная частота

E - модуль Юнга

ρ - плотность кремния
 l, h - длина и толщина резонатора
 ε - напряжение (плотность силы) растяжения
 ε_0 - начальное напряжение растяжения
 ε_{dp} - изменение напряжения растяжения, обусловленное дифференциальным давлением
 ε_{sp} - изменение напряжения растяжения, обусловленное статическим давлением

Сигналы дифференциального и статического давления можно вычислить, выполняя дифференцирование и суммирование для двух резонаторов соответственно. Для простоты объяснения вычисление резонансной частоты здесь сведено к следующему уравнению:

$$f^2 = f_{02}^2 * (1 + G_f * \varepsilon),$$

где

f_0 - резонансная частота при нулевой силе растяжения
 G_f - возведенная в квадрат чувствительность резонатора ($= 0,2366 * (l/h)^2$)

Изменения (Δf^2) резонансных частот f_1 и f_2 двух резонаторов, расположенных на одной кремниевой мембране, обусловленные давлением, задаются следующими уравнениями (1):

$$\Delta f_1^2 = f_{01}^2 * G_{f1} (+\varepsilon_{dp1} + \varepsilon_{sp1})$$

$$\Delta f_2^2 = f_{02}^2 * G_{f2} (+\varepsilon_{dp2} + \varepsilon_{sp2})$$

Как видно из этих уравнений, вычисление выражения $\Delta f_1^2 - a * \Delta f_2^2$ позволяет исключить члены, относящиеся к статическому давлению, и получить сигнал дифференциального давления. Аналогично, вычисление выражения $\Delta f_1^2 + b * \Delta f_2^2$ позволяет исключить члены, относящиеся к дифференциальному давлению, и получить сигнал статического давления. Основное свойство кремниевого резонансного сенсора заключается в том, что предварительное определение каждого коэффициента на основе фактически измеренных соответствующих данных позволяет рассчитать сигналы дифференциального и статического давления на основе деформации одной мембраны посредством выполнения простых операций вычитания и суммирования.

На рисунке 2 показана реальная погрешность определения статического давления 1 МПа при допустимой сложности спецификации погрешности $\pm 0,2\%$. В более сложном датчике дифференциального давления с функциями вычисления расхода благодаря этому свойству стало возможным реализовать гарантированную точность для статического давления в 1 МПа даже более высокую - $\pm 0,1\%$.

Датчики дифференциального давления серии EJX с протоколом FOUNDATION fieldbus могут одновременно передавать сигналы дифференциального и статического давления.

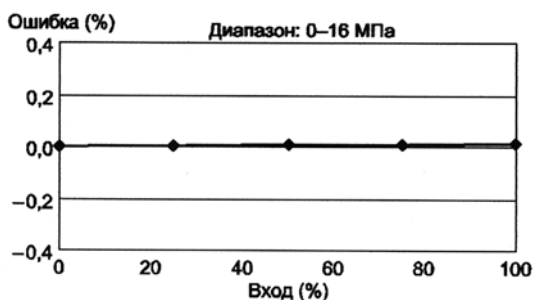


Рис.2. Погрешность измерения сигналов статического давления

В приборах серии EJX с протоколом HART предусмотрена возможность отображения на дисплее также и статического давления.

Уже существует многопараметрические датчики, которые выполняют измерение дифференциального и статического давления с использованием нескольких сенсоров. Приборы серии EJX являются первой в мире серий датчиков дифференциального давления, которые могут выполнять измерения дифференциального и статического давления с использованием одного сенсора, а также обеспечивать считывание и вывод значений давления.

Высоко надежный чувствительный элемент

Стабильность кремниевого резонансного чувствительного элемента, используемого в приборах серии EJX, обусловлена принципом его действия. Превосходную рабочую стабильность приборов этой серии демонстрируют не только записи долговременной эксплуатации, но также и результаты 15-летней проверки долговременного дрейфа (рис. 3).

Снова рассмотрим свойства кремниевого резонансного сенсора, которые заключаются в следующем:

(a) Сенсор имеет отличные упругие свойства кремния.

(b) Сенсор имеет большой коэффициент тензочувствительности (≥ 2000) и соответственно высокую чувствительность измерения давления.

(c) Поскольку резонансные частоты резонаторов зависят от их механических и конструктивных размеров, сенсор имеет очень малые температурные коэффициенты и очень низкую чувствительность к примесям по сравнению с пьезорезистивными сенсорами. В результате сенсор обеспечивает высокую долговременную стабильность.

(d) Резонансную частоту можно считывать непосредственно с использованием счетчика центрального процессора, тем самым обеспечивая высокую точность обработки данных. Поэтому такой сенсор идеально подходит для использования в интеллектуальных датчиках. Кроме того, поскольку сенсор не подвержен влиянию ошибок аналого-цифрового преобразования, присущих датчикам давления, основанных на других принципах работы, точность датчика можно очень легко увеличивать дальше.

(e) Используя большую часть возможностей кремниевого резонатора с большим коэффициентом тензочувствительности, и всего лишь обрабатывая сигналы от двух резонаторов, можно получить значения давлений с гораздо большей стабильностью, чем то же самое с использованием пьезорезистивных датчиков.



Рис.3. Результаты проверки долговременного дрейфа

(f) Имеется возможность измерения температуры кремниевой мембраны через сопротивление резонатора. Температурная зависимость коэффициента упругости кремния хорошо изучена и достаточно четко определена (3). При этом, в дополнение к тому, что она и так значительно меньше аналогичной зависимости упругости металлических и керамических мембран, применяемых в емкостных датчиках, информация о температуре сенсора позволяет делать дополнительную коррекцию на этот эффект, также как и на другие факторы влияния температуры капсулы на дрейф показаний сенсора.

Быстрый отклик

В приборах серии EJX для увеличения быстродействия применен новый механизм защиты от перегрузки по давлению, а электронные схемы выполняют вычисления с высокой скоростью. Тем самым эти приборы стало возможным применять в контурах высокоскоростного управления, например - для управления расходом пара в турбинах. В результате этих доработок достигнута реакция 63% от воздействия за 95 мс.

В существующих датчиках дифференциального давления серии EJA в защите от перегрузок реализована идеология емкостных датчиков давления: внутри капсулы сделан дополнительный объем с центральной мембраной, демпфирующий перегрузку, перепуская избыток жидкости на сторону низкого давления, как показано на рисунке 4. Естественно, существует гидродинамическое сопротивление внутри передающих жидкостью капилляров, которое существенно увеличивает время отклика.



Рис. 4. Устройство защиты от перегрузки по давлению датчика EJA110

Новый механизм защиты от перегрузки по давлению, используемый в приборах серии EJX, проиллюстрирован на рисунке 5.



Рис. 5. Новый механизм защиты от перегрузки по давлению датчика EJX 110

Этот механизм состоит из двух взаимно независимых механизмов защиты от перегрузки по давлению, распо-

ложенных на сторонах высокого (H) и низкого (L) давления. Этот механизм предотвращает движение внутренней жидкости в пределах диапазона измерения давления, обеспечивая быстрый отклик приборов серии EJX.

В части электроники были предприняты следующие шаги, с помощью которых удалось уменьшить период обработки данных в четыре раза по сравнению с обычными датчиками:

(1) Определение частоты

С использованием контура подсчета частотных сигналов измеряются периоды, меньшие одного импульса, так что частота может быть измерена без потери разрешения даже в случае более коротких времен выборки. Подробности будут изложены в следующем разделе.

(2) Увеличение скорости вычисления значения давления

Использование следующих четырех методов позволило увеличить скорость обработки при вычислении давления в 4 раза по отношению к существующим приборам серии EJA.

- Минимизирована частота использования вычислений с плавающей запятой и введены вычисления с фиксированной запятой.

- Элементы вычислений, имеющие минимальные изменения, выполняются как работы с низким приоритетом, позволяя минимизировать объем вычислений, непосредственно связанных с определением значения давления

- Увеличена скорость системных часов за счет использования маломощных конструкций устройств.

- Усовершенствованы характеристики микропроцессора.

(3) Усовершенствование резонаторов

С использованием техники микрообработки удалось увеличить выходное напряжение резонаторов в 1,5 раза без изменения их основной структуры (рисунок 6). Это привело к значительному увеличению стабильности выходного напряжения и существенному снижению времени обработки сигнала.

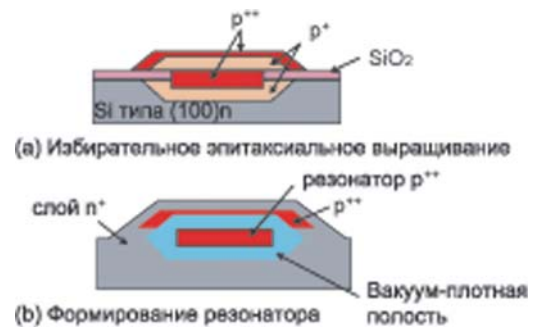


Рис. 6. Вид резонатора в поперечном разрезе

На рисунке 7 показана переходная характеристика (реакция на ступенчатое изменение давления) для наиболее распространенной модели серии EJX - датчика дифференциального давления EJX110 с капсулой M.

Расширенные функции самодиагностики

Функции самодиагностики приборов серии EJX были расширены, так что теперь эти приборы имеют 30 элементов диагностики и около 20 видов сигнализаций. Количество сигнализаций различается в зависимости от модели. Эти сигнализации можно классифицировать по четырем категориям:

- (a) Неисправная работа самого датчика
- (b) Неправильная установка параметров
- (c) Ошибочные переменные процесса
- (d) Выполнение работы с несоблюдением допустимых или заложенных условий эксплуатации

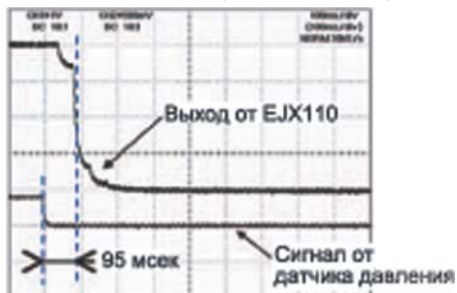


Рис. 7. Реакция на единичный скачок EJX110

КОНСТРУКЦИЯ

Конфигурация

На рисунке 8 показаны компоновочные составляющие датчиков дифференциального давления серии EJX. В целом датчик можно представить состоящим из 2-х частей: блока восприятия давления и блока преобразования.



Рис. 8. Компоновочные блоки прибора EJX110

Использование нового механизма защиты от чрезмерного давления позволило уменьшить размеры устройства восприятия давления таким образом, что его вес составляет только 2.7 кг, это уменьшение веса на 30% по отношению к датчику серии EJA.

Блок восприятия давления состоит из капсулы, фланцевых крышек и штуцеров для подсоединения к процессу.

Блок преобразования состоит из электронной части и клеммной коробки, которые идентичны для всех моделей серии EJX (единственное, они могут меняться в зависимости от используемых протоколов связи). Этот блок также может компоноваться цифровым ЖК-дисплеем, на котором пользователи имеют возможность отслеживать измеренные значения дифференциального и статического давления, а также сообщения сигнализаций.

Блок восприятия давления

Для создания датчика дифференциального давления, невосприимчивого к изменениям температуры и способного выполнять стабильные измерения, усилия были сконцентрированы в первую очередь на создании конструкции с минимальным объемом жидкости, передающей давление от разделительной мембраны к сенсору в измерительной капсуле. Использование описанного выше нового механизма защиты от чрезмерного давления позволило уменьшить объем этой жидкости в 10 раз по сравнению с датчиками серии EJA.

Блок восприятия давления имеет симметричную

структуру, устойчивую к воздействию различных возмущений, обусловленных внешним давлением. Объемы жидкости внутри капсулы на сторонах высокого и низкого давления хорошо сбалансированы, так что влияние эффектов, обусловленных расширением или сжатием внутренней жидкости, вызванных изменением температуры или статического давления, минимизировано.

Для изготовления внутренних разделительных мембран используется специально пассивированный высококачественный никелевый сплав Hastalloy C, представляющий собой испытанный в производстве коррозионно-стойкий материал, также используемый для датчиков серии EJA. При этом никакие сварные соединения не контактируют с атмосферой. Для корпуса капсулы используется ковкая нержавеющая сталь 316L, и тем самым обеспечивается коррозионно-стойкая конструкция.

Для уменьшения влияния нагрузки, возникающей при закреплении фланцевых крышек, было уделено серьезное внимание обеспечению механической изоляции. Поверхности сварных соединений разделительной мембраны и детали, на которой закрепляется прокладка, были отделены друг от друга для предотвращения дополнительных напряжений в разделительной мембране, связанных с нагрузкой при затягивании болтов крепления фланцевых крышек. Фланцевые крышки, обеспечивающие подключение к процессу, имеют конструкцию, отвечающую стандарту IEC61518.

Блок преобразования

В датчиках серии EJX используется тот же самый метод возбуждения резонатора, что и в датчиках серии EJA (рис. 9). Недавно компанией Yokogawa было разработано устройство ASIC, основанное на малошумной структуре, с низким потреблением тока, использование которого обеспечивает в три раза более высокие характеристики по сравнению с датчиками обычных серий.

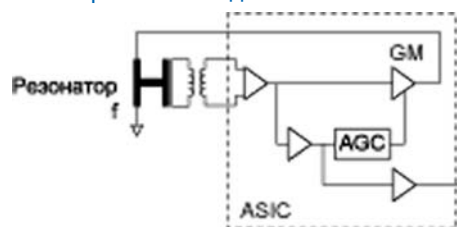


Рис. 9. Блок-схема цепи возбуждения (показана только для одного резонатора)

На рисунке 10 показана общая блок-схема блока преобразования.

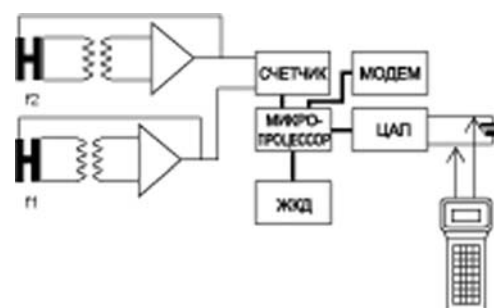


Рис. 10. Общая блок-схема

Следует отметить, что частотные сигналы от резонатора являются асинхронными по отношению к системным часам счетного контура.

По этой причине периоды времени (дробные отрезки времени), которые периода системных часов и поэтому не могут быть измерены, возникают на обоих концах интервала времени выборки в случае применения используемого в ЕJA контура счетчика, основанного на методе взаимодействия. Соответственно, при этом возникает погрешность, эквивалентная \pm одному импульсу.

Если для увеличения скорости обработки сигнала сократить время выборки без повышения частоты системных часов, эта погрешность возрастает, ухудшая разрешение счетчика. Если чрезмерно увеличивать частоту системных часов, то будет увеличиваться потребление тока, что выводит прибор за рамки требуемых характеристик.

В приборах серии EJX в дополнение к обычному методу взаимодействия используется метод растяжения временного масштаба⁽²⁾, в котором эти дробные отрезки времени расширяются в 64 раза, а затем измеряются. Используя метод растяжения временного масштаба при помощи дополнительных мер, в частности, добавления специального счетчика стало возможным обеспечить низкое потребление электроэнергии и высокую скорость обработки сигнала, а также - высокое разрешение, превышающее в пять раз или более разрешение приборов обычных серий.

Использование мультиплексного метода цифро-аналогового преобразования (D/A) для блока цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) позволило получить быстрый отклик, в 10 раз или более превышающий отклик приборов обычных серий, при одновременном сохранении высокого разрешения.

В выходном контуре 4 20 мА используется 16-битовый контур цифро-аналогового преобразования, и диапазон токового выхода удовлетворяет стандарту NAMUR NE43.

Встроенный дисплей

Учитывая важность удобства восприятия информации, были увеличены размеры встроенного дисплея, при этом в целом размеры приборов серии EJX были уменьшены (рис. 11).



Рис. 11. Вид встроенного дисплея

К элементам, отображаемым на дисплее, были добавлены гистограммы, значения переменных процесса, показатели степени и единицы измерения.

(1) Индикация параметра процесса

Пользователи могут выбрать для отображения на дисплее максимум четыре из следующих пяти параметров: 1) значение дифференциального давления в процентах, 2) значение масштабного коэффициента и единицы измерения, 3) значение дифференциального давления, 4) значение статического давления в процентах и 5) значение статического давления. Выбранные параметры при этом будут чередующимся образом периодически отображаться на дисплее. Усовершенствованный дизайн отображения переменной в виде гистограммы позволит пользователю мгновенно определить, находится ли переменная процесса в пределах нормального рабочего диапазона.

Для отображения единиц измерения и коэффициента масштабирования можно использовать до шести символов. Функциональность дисплея усовершенствована таким образом, что наиболее часто используемые единицы измерения, такие, как, например, единицы расхода, могут быть заданы пользователями. Пользователи могут также вывести на дисплей показатели степени (10, 100 и 1000), которые следует использовать для представления фактических коэффициентов масштабирования.

(2) Дисплей сообщений о сигнализациях

При обнаружении неисправности на дисплее появится короткое сообщение, содержащее в дополнение к номеру сигнализации информацию о сигнализации. Из короткого сообщения пользователи смогут быстро узнать о содержании сигнализации, не сверяясь с документацией для поиска описания по номеру сигнализации.

Если возникнет сигнализация, относящаяся к установкам параметров, переменным процесса или рабочей среды, на дисплее будут чередоваться номер сигнализации и значение переменной процесса. Если возникнет сигнализация, относящаяся непосредственно к датчику, дисплей покажет только информацию о сигнализации, обеспечивая пользователей необходимой информацией так быстро, как это возможно.

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В настоящем разделе даются примеры характеристик прибора EJX110 (капсула M; диапазон измерения давления ± 100 кПа), являющегося наиболее типовой моделью приборов серии EJX.

Характеристики

На рисунке 12 показаны характеристики входа-выхода для диапазонов 0-100 кПа, 0-10 кПа и 0-1 кПа. На рисунке 13 показан дрейф нулевой точки при изменении температуры окружающей среды от 40°C до 80°C. На рисунке 14 показан дрейф нулевой точки при изменении статического давления от 0 МПа до максимального рабочего давления 16 МПа.

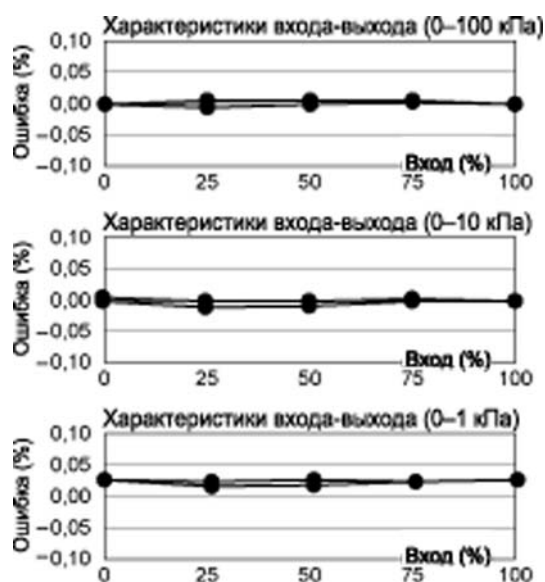


Рис. 12. Характеристики входа-выхода

Влияние перегрузки по давлению

При нормальных условиях датчик дифференциального давления часто монтируется с использованием 3-х вентильного блока.

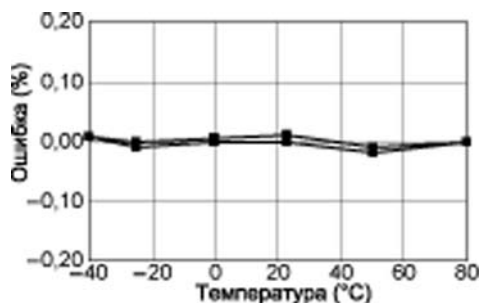


Рис. 13 Влияние изменений температуры окружающей среды на нулевую точку (Диапазон: Максимальный диапазон 1/10)

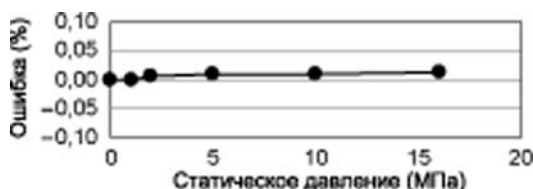


Рис. 14. Влияние изменений статического давления на нулевую точку (Диапазон: Максимальный диапазон 1/10)

При этом достаточно часто возникают ситуации, когда в зависимости от положения вентилей 3 х вентильного блока во время запуска установки или работы по обслуживанию к одной из сторон датчика может быть приложено чрезмерное давление, выходящее за пределы диапазона измерения дифференциального давления.

Чтобы избежать возможного сдвига выхода или повреждения кремниевой мембраны за счет перегрузки по давлению, датчик оснащен механизмом защиты от чрезмерного дифференциального давления.

На рисунке 15 показано влияние односторонней перегрузки по давлению.

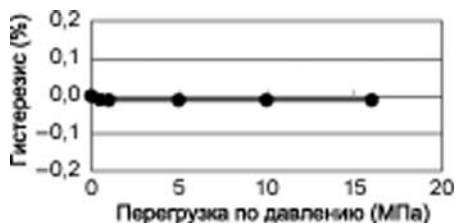


Рис. 15. Влияние перегрузки по давлению (Диапазон: Максимальный диапазон)

Поскольку влияние перегрузки по давлению является незначительным, и датчик достаточно легкий, многие пользователи могут монтировать его непосредственно на оборудовании без применения 3-х вентильного блока.

СПЕЦИФИКАЦИЯ

На рисунке 16 показан диапазон измерения давления для датчика дифференциального давления EJX110. Четыре типа капсулы полностью охватывают диапазон шкал измерения давления от 0,1 кПа до 14 МПа. Капсулы М, Н и V имеют глубину перестройки шкалы 1:200, предоставляя пользователям возможность измерения дифференциального давления в широком диапазоне.

Имеется возможность выполнения дистанционной настройки и мониторинга через протокол связи HART посредством ручного коммуникатора или распределенной системы управления (DCS). Для приборы серии EJX также поддерживают протокол FOUNDATION fieldbus.



Рис. 16. Диапазоны шкал измерения давления для датчиков дифференциального давления

Для поддержки многообразия возможных применений Yokogawa представила большое семейство датчиков серии EJX, включающее датчики избыточного давления, абсолютного давления, дифференциального давления, монтируемые на фланце ввертного исполнения, датчики дифференциального давления для высокого статического давления, датчики с разделительными мембранами, а также - многопараметрические датчики с функцией вычисления расхода. Все это семейство датчиков было сертифицировано на соответствие различным типам искробезопасности, взрывобезопасности и пожаробезопасности. Как упоминалось выше, частота резонаторов определяется механическими размерами и физическими свойствами, и на нее не влияют другие возмущения, поэтому достаточно легко определить их состояние и насколько достоверны показания прибора. В приборах серии EJX также реализованы специальные программы для проверки вычислений микропроцессора. Серия EJX сертифицирована на соответствие Интегрированному уровню безопасности 2 (SIL2) уже в стандартном исполнении.

ВЫВОДЫ

В данной статье были представлены особенности, конструкция и характеристики преобразователей давления новой серии EJX. Мультисенсорная функция кремниевого резонансного чувствительного элемента реализует новые возможности в решении прикладных задач. Комбинирование этой функции с программными средствами позволяет выполнять всевозможные расширенные диагностики, такие как диагностика импульсных линий.

Компания Yokogawa продолжит дальнейшие разработки в области измерительных технологий нового поколения с тем, чтобы пользователи все больше могли применять датчики серии EJX в качестве многофункциональных приборов."

ССЫЛКИ

- (1) Saegusa Tokuji, Gotoh Shigeru, Kuwayama Hideki, Michiaki Yamagata "DPHarp Series Electronic Differential Pressure Transmitters", Yokogawa Technical Report, №15, 1992, pp. 30-37
- (2) Katano Kazuya, "How to Use Time-measuring Instruments," Transistor Gijutsu, Vol. 31, №2, 1994, pp. 331-340 (на Японском)
- (3) McSkimin, H.J., J. Appl. Phys. 24, 8 (1953) 988-997. Morin, F.J. and J.P. Maita, Phys.Rev. 96, 1 (1954) 28-35

Координаты:

Головной офис ООО "Июкогава Электрик СНГ"
 129090 Москва, Россия,
 Грохольский переулок, 13, строение 2.
 Телефон: +7 (495) 737 7868, 737 7871, 933 8590
 Факс: +7 (495) 737 78 69, 933 85 49
 E-mail: info@ru.yokogawa.com

<http://www.yokogawa.ru>