

УДК 004.032.2

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Семенов Н.Ю., аспирант гр. 233-2024, I курс,  
Научный руководитель: Карелин А.Е., к.т.н., доцент кафедры КСУП  
Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники  
Россия, г. Томск

Расходомер представляет собой прибор для измерения расхода вещества (жидкости, газа, пара или сыпучих материалов), проходящего через определенное сечение трубы или канала за единицу времени. Расходомеры могут определять объемный расход (количество вещества в литрах/кубических метрах, прошедшее через сечение за единицу времени) или массовый расход (массу вещества в граммах/килограммах/тоннах, прошедшую через сечение за единицу времени). Поскольку сжимаемые и несжимаемые вещества имеют свою специфику измерения, то и устройства в этом сегменте различаются по принципам действия. Каждая категория рассчитана на работу в среде с определенными эксплуатационными характеристиками, отличается особыми параметрами, имеет свои преимущества и недостатки.

В основе работы *электромагнитных расходомеров* лежит закон электромагнитной индукции Фарадея. Этот закон гласит, что когда проводник движется в магнитном поле, в нем индуцируется электродвижущая сила (ЭДС). В случае электромагнитного расходомера, проводником является протекающая жидкость (или другой проводящий материал), а магнитное поле создается катушками, расположенными снаружи трубы расходомера. Индуцированная ЭДС прямо пропорциональна скорости потока жидкости, магнитной индукции и диаметру трубы. Поскольку магнитная индукция и диаметр трубы являются известными и постоянными величинами для конкретных условий, измерительный блок может вычислить скорость потока жидкости на основе измеренной ЭДС. Зная скорость потока и площадь поперечного сечения трубы, можно вычислить объемный расход.

Преимуществами электромагнитных расходомеров являются: независимость точности измерения расхода от температуры, давления, плотности, вязкости и других свойств жидкости; отсутствие в расходомере движущихся частей; отсутствие препятствий для потока жидкости; высокая точность и широкий диапазон измерений расхода; нечувствительность к загрязнениям. К недостаткам электромагнитных расходомеров следует отнести следующие: вещество должно обладать минимальной электропроводностью; прибор чувствителен к электромагнитным помехам, поэтому требуется его экранирование.

*Ультразвуковые расходомеры* используют ультразвуковые волны для измерения скорости потока вещества в трубопроводе [1].

Существует несколько типов ультразвуковых расходомеров, но два основных – это доплеровские и времяимпульсные ультразвуковые расходомеры.

Принцип работы доплеровского ультразвукового расходомера основан на эффекте Доплера, который заключается в изменении частоты волны, воспринимаемой наблюдателем, движущимся относительно источника волны. Ультразвуковой преобразователь излучает ультразвуковой сигнал определенной частоты в поток вещества, сигнал отражается от частиц вещества, отраженный сигнал принимается тем же или другим ультразвуковым датчиком. Из-за движения частиц или пузырьков, частота отраженного сигнала изменяется, сдвиг частоты пропорционален скорости движения частиц, а, следовательно, и скорости потока жидкости. Расходомер измеряет доплеровский сдвиг и вычисляет скорость потока вещества.

Данный тип расходомера хорошо подходит для измерения расхода жидкостей с примесями, суспензиями, шламами или пузырьками. Точность измерений зависит от концентрации и размера отражающих частиц, для чистых жидкостей и низких скоростей потока точность снижается.

Принцип работы времяимпульсных (времяпролетных) ультразвуковых расходомеров основан на измерении времени прохождения ультразвукового сигнала через поток вещества в прямом и обратном направлениях. Для реализации этого принципа два ультразвуковых датчика устанавливаются на трубе на определенном расстоянии друг от друга. Один датчик излучает ультразвуковой сигнал по направлению потока, а другой принимает его. Затем датчики меняются ролями: второй датчик излучает сигнал против направления потока, а первый его принимает. Время прохождения сигнала по направлению потока будет меньше, чем время прохождения сигнала против направления потока. Разница во времени прохождения сигналов пропорциональна скорости потока вещества, которую и измеряет расходомер.

Выделяют следующие типы времяимпульсных расходомеров – с клиновыми преобразователями, в которых датчики устанавливаются снаружи трубы, и с врезными преобразователями, в которых датчики устанавливаются непосредственно в поток вещества. Как правило, ультразвуковые расходомеры комплектуются аналоговым выходом и микропроцессорным блоком управления, а все отображаемые данные выводятся на LED-дисплей.

Времяимпульсные расходомеры более точны, чем доплеровские расходомеры, подходят для измерения расхода чистых жидкостей и газов.

К достоинствам ультразвуковых расходомеров следует отнести устойчивость к вибрациям и ударам; стабильный долговечный корпус; подходят для нефтеперерабатывающей промышленности и систем охлаждения; выполняют замеры расхода воды и жидкостей, подобных воде по физическим свойствам; работают в среднем динамическом диапазоне измерений; могут монтироваться на трубопроводы больших диаметров. Недостатки: повышенная чувствительность к вибрациям, электромагнитным полям и ультразвуковым волнам[2]; восприимчивость к осадкам, поглощающим либо отражающим

ультразвук; материал трубопровода должен быть звукопроводящим [3]; диапазон измерений от 2% до 100% верхнего предела измеряемого расхода. При измерении объемного расхода в пределах от 0 до 2 % диапазона измерения погрешность не нормируется, показания прибора равны нулю [3].

**Расходомеры тахометрического типа** измеряют объемный расход жидкости или газа путем измерения скорости вращения крыльчатки, помещенной в поток движущегося вещества. Крыльчатка установлена в измерительной трубке, которая обеспечивает прямолинейное и равномерное распределение потока среды вокруг крыльчатки. Конструкция трубки минимизирует турбулентность, а форма и количество лопастей крыльчатки оптимизированы для обеспечения линейной зависимости между скоростью потока и частотой вращения крыльчатки. Попадая в поток движущегося вещества, крыльчатка начинает вращаться с частотой, пропорциональной скорости потока. Чем больше скорость потока, тем быстрее вращается крыльчатка.

Для преобразования частоты вращения крыльчатки в электрический сигнал используется магнитоэлектрические или оптические датчики. Электрический сигнал от датчика поступает на электронную плату, где он обрабатывается. Результат измерения расхода отображается на дисплее расходомера, а также может передаваться на внешние устройства через аналоговые или цифровые интерфейсы (RS-232, RS-485).

На точность измерений расходомеров тахометрического типа влияют такие факторы, как вязкость, плотность и температура среды, турбулентность потока, загрязнения на лопастях крыльчатки. В целом, тахометрические расходомеры просты в использовании, работают без источника питания, относительно недороги и обеспечивают достаточно высокую точность измерений в бытовых условиях. Для трубопроводов большого диаметра (то есть в промышленном учете) тахометрические расходомеры будут слишком дорогими из-за повышенной металлоемкости, а также громоздкими; они создают гидравлическое сопротивление потоку и в случае с большими диаметрами труб могут стать причиной «блокировки» или выйти из строя из-за механических поломок; обладают невысокой надежностью и точностью для промышленных измерений.

**Кориолисовы расходомеры** – это высокоточные приборы для измерения массового расхода жидкостей и газов. Их принцип работы основан на эффекте Кориолиса, возникающем при движении тела во вращающейся системе отсчета. В кориолисовом расходомере трубка, по которой протекает измеряемое вещество, приводится в колебательное движение с высокой частотой. Когда жидкость или газ протекает через вибрирующую трубку, на них действует сила Кориолиса. Эта сила вызывает небольшое смещение трубки – один конец трубки отклоняется в одну сторону, другой – в противоположную. Величина этого смещения, измеряемая пьезоэлектрическими или емкостными датчиками, прямо пропорциональна массовому расходу среды.

К преимуществам кориолисовых расходомеров следует отнести прямое измерение массового расхода, высокую точность, широкий диапазон измере-

ний, слабое влияние на точность измерений наличия примесей. Современные кориолисовые расходомеры выполняют автоматическую компенсацию таких факторов, как плотность, температура и давление измеряемого вещества.

Недостатками данного типа расходомеров является высокая цена, чувствительность к вибрациям, необходимость высокоточного монтажа.

**Вихревые расходомеры** – это устройства для измерения объемного расхода жидкостей и газов, принцип работы которых основан на явлении вихреобразования за препятствием, помещенным в поток. В основе работы вихревого расходомера лежит закон о вихревом следе, открытый Теодором фон Карманом. Согласно этому закону, при обтекании потоком жидкости или газа тела (например, призмы или цилиндра), за телом образуется периодическая цепочка вихрей (вихревой след Кармана). Частота образования этих вихрей прямо пропорциональна скорости потока. Расположенный за телом обтекания датчик регистрирует частоту срыва вихрей. В качестве датчика могут использоваться пьезоэлектрические или ультразвуковые датчики, термоанемометры.

Преимущества вихревых расходомеров – это высокая точность и широкий диапазон измерений, слабая зависимость точности измерений от вязкости и плотности среды, простая конструкция и эксплуатация, отсутствие движущихся частей, что обеспечивает высокую надежность и долговечность. К недостаткам вихревых расходомеров относят зависимость точности измерений от распределения скорости потока в трубе перед телом обтекания, ограничения по давлению, вязкости и температуре, чувствительность к загрязнению тела обтекания.

В основе принципа действия **расходомеров перепада давления** лежит измерение перепада давления, возникающего в момент прохождения жидкостного или газового потока через сужающееся приспособление (сопло, диафрагму, трубку Вентури). В этом месте скорость потока увеличивается, а статическое давление уменьшается. Перепад давления измеряется с помощью двух датчиков давления, установленных до и после сужающего устройства. В качестве датчиков могут использоваться дифференциальные манометры или дифференциальные преобразователи давления.

Величина перепада давления до и после сужающего устройства прямо пропорциональна квадрату скорости потока, а, следовательно, и квадрату расхода. Однако уравнения для расчета расхода довольно сложны и содержат эмпирические коэффициенты, которые зависят от геометрии сужающего устройства и свойств потока. Это приводит к необходимости калибровки прибора.

Преимущества данного типа расходомера является простота конструкции и эксплуатации, относительно низкая стоимость, широкий диапазон измерений. К недостаткам следует отнести зависимость от свойств среды, потери давления из-за наличия сужающего устройства, ограничения по давлению и температуре, нелинейность зависимости между перепадом давления и расходом, что требует применения корректирующих коэффициентов.

Таким образом, выбор расходомера зависит от конкретных требований к качеству измерений: оптимальный выбор определяется компромиссом между требуемой точностью, допустимой стоимостью и условиями эксплуатации.

#### **Список литературы:**

1. Близнюк В., Костылев В., Сорокопут В., Стеценко А., Стеценко, А. Ультразвуковые расходомеры и система учета на их основе. //Измерительная техника. – 1998. – №. 2. – С. 56-57.
2. Руководство по эксплуатации ультразвукового расходомера Streamlux SLS-720. Режим доступа: <https://sls.nt-rt.ru/images/manuals/SLS-720F.pdf>
3. Расходомер ультразвуковой с накладными излучателями АКРОН-01. Руководство по эксплуатации. Режим доступа: [https://signur.nt-rt.ru/images/manuals/RE\\_UZV\\_AKR1.pdf](https://signur.nt-rt.ru/images/manuals/RE_UZV_AKR1.pdf)