

УДК 004.032.2

## УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ: ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

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

В современном мире, где точность и скорость имеют первостепенное значение, традиционные методы измерения потока различных веществ уже не могут удовлетворить растущие требования как промышленности, так и потребителей. Интеллектуальные расходомеры представляют собой инновационную категорию приборов, которые предлагают революционный подход к контролю, мониторингу и измерению объемного или массового потока различных веществ. Эти вещества включают природный газ, воспламеняющиеся и агрессивные газы, продукты разделения воздуха и жидкости. Интеллектуальные расходомеры все чаще используются в таких отраслях, как нефтегазовая, химическая, фармацевтическая и пищевая промышленности, где точные измерения потока критически важны для обеспечения операционной эффективности и безопасности.

Одним из ключевых преимуществ интеллектуальных расходомеров является возможность автоматического расчета потока вещества, что исключает необходимость постоянного вмешательства специалистов. Это не только делает приборы чрезвычайно удобными, но и значительно снижает операционные затраты, повышая экономическую эффективность. Однако выбор правильного расходомера требует тщательной оценки нескольких факторов, таких как тип измеряемого вещества, условия эксплуатации и требуемая точность измерений. Эти соображения имеют решающее значение для обеспечения точности и надежности измерений в различных промышленных приложениях.

Ультразвуковыми называют расходомеры, использующие явления, возникающие при прохождении ультразвуковых колебаний через поток жидкости или газа. Ультразвуковые расходомеры для определения расхода измеряемого вещества используют один из двух принципов.

Первый принцип [1, 2] основан на факте, что скорость распространения ультразвуковой волны в движущейся среде является векторной суммой скорости распространения ультразвука в неподвижной жидкости и скорости течения жидкости. В ультразвуковых расходомерах, работающих на этом принципе, отклонение скорости распространения ультразвуковой волны в движущейся среде от её значения в неподвижной жидкости определяются с помощью времяимпульсного, фазового или частотного методов. Времяимпульс-

ный метод состоит в измерении разности времен  $\Delta t$  прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него. Фазовый метод состоит в измерении разности фаз  $\Delta \phi$  между ультразвуковыми колебаниями, распространяющимися по потоку и против потока. Частотный метод состоит в измерении разности частот  $\Delta f$  ультразвуковых колебаний, распространяющихся по потоку и против потока. Разница во времени прямо пропорциональна скорости потока. Зная скорость и площадь сечения трубы, можно рассчитать объемный расход.

Для примера рассмотрим работу ультразвукового времяимпульсного расходомера УВР011 [1, 2]. Работа устройства состоит из передачи ультразвукового сигнала с использованием электроакустических преобразователей (ЭП), закреплённых с внешней стороны трубопровода, измерения временных интервалов распространения сигналов и расчёта скорости и расхода жидкости на основе разности времён прохождения сигналов. Структурная схема устройства представлена на рисунке 1, который иллюстрирует расположение ЭП и основные блоки системы.

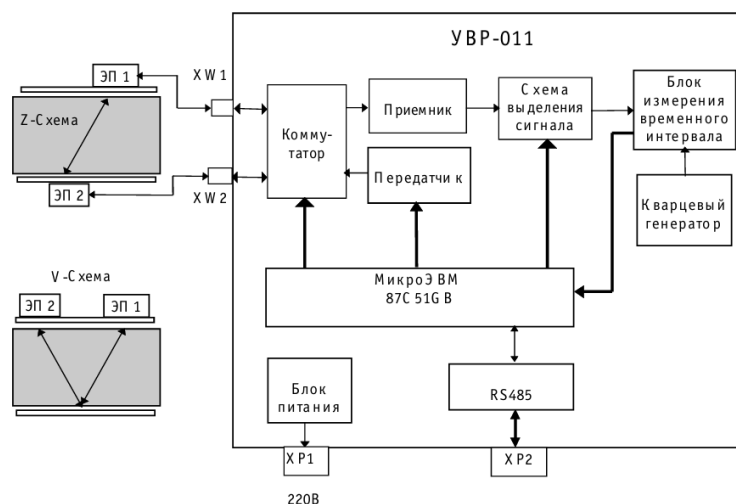


Рисунок 1 – Структурная схема ультразвукового времяимпульсного расходомера УВР011

Второй принцип основан на эффекте Доплера [1]. Принцип основан на измерении изменения частоты ультразвуковых волн, отраженных от частиц, движущихся вместе с потоком. Изменение частоты прямо пропорционально скорости частиц, а, следовательно, и скорости потока. Этот метод подходит для измерения расхода мутных жидкостей, содержащих взвешенные частицы, или газов с наличием аэрозолей, поскольку отражение происходит от этих частиц.

Для примера рассмотрим работу расходомера, основанного на принципе Доплера [1]. Работа устройства включает генерацию ультразвуковых волн, приём отражённого сигнала, содержащего информацию о движении частиц, анализ спектра отражённого сигнала для выделения доплеровского сдвига частоты. Структурная схема доплеровского расходомера, представленная на рисунке 2, демонстрирует принцип работы и ключевые компоненты, включая

передатчик, приёмник и схему обработки сигнала.

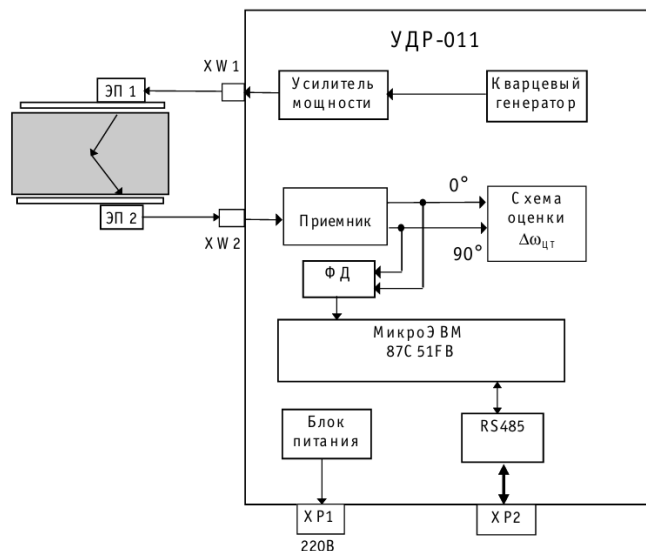


Рисунок 2 – Структурная схема ультразвукового доплеровского расходомера УДР011

Времяимпульсные и доплеровские расходомеры имеют различную сферу применения, обусловленную их техническими характеристиками и используемыми методами. Времяимпульсные приборы обеспечивают высокую точность для чистых жидкостей за счёт времяимпульсного метода, тогда как доплеровские расходомеры, использующие метод Доплера, предназначены для сложных потоков с включениями. Оба типа расходомеров используют накладные датчики, что упрощает их установку и обслуживание.

Основными характеристиками ультразвуковых расходомеров являются точность, диапазон измерений, надёжность. Большинство исследований посвящено изучению точности измерений и влиянию на нее различных факторов.

В работе [1] показано, что при стабильных условиях без изменения температуры и состояния трубопровода стандартная погрешность времяимпульсных расходомеров, таких как УВР-011, не превышает 1,5%, а для доплеровских расходомеров, таких как УДР-011, составляет около 2%.

В работе [2] отмечается, что отклонение формы поперечного сечения трубопровода от идеального круга, например, овальность, может привести к относительной погрешности измерений до 5% в зависимости от степени деформации. Наличие отложений на внутренних стенках трубы, уменьшающих эффективный диаметр, также вызывает значительные погрешности, особенно если система не предусматривает регулярную очистку труб. Толщина отложений до 25% от диаметра трубопровода может существенно повлиять на точность. Температура жидкости также оказывает влияние на точность измерений. Изменение температуры на  $\pm 10$  °С относительно номинальной добавляет погрешность, сравнимую с основными допусками прибора.

В работе [3] отмечается, что для устранения гидродинамической погрешности производители используют многолучевые схемы первичных пре-

образователей. В этих приборах проходит приближенное интегрирование эпюры скоростей. Другим способом повышения точности измерений авторы указывают цифровую обработку сигнала. Цифровая обработка позволяет путем оценки качества сигнала тестировать условия эксплуатации и определять достоверность полученных результатов измерения, а также диагностировать работоспособность узлов расходомера.

Полученные результаты показывают, что для повышения точности ультразвуковых расходомеров необходимо учитывать ряд дополнительных факторов, включая регулярный мониторинг состояния трубопроводов, корректировку параметров прибора с учётом изменений температуры и структуры потока. Внедрение современных методов обработки данных и адаптивных алгоритмов может существенно снизить влияние этих факторов. Эти выводы подчёркивают важность комплексного подхода к проектированию и эксплуатации систем измерения расхода жидкостей.

Ключевую роль в повышении точности, надёжности и адаптации к сложным условиям эксплуатации ультразвуковых расходомеров играет внедрение новых методов обработки данных и расширение возможностей существующих алгоритмов.

Одним из направлений повышения точности ультразвуковых расходомеров является использование продвинутых методов фильтрации данных для подавления шумов и устранения артефактов, возникающих в процессе измерений. Например, применение адаптивных фильтров или алгоритмов на основе вейвлет-преобразований позволит минимизировать влияние внешних помех, вызванных вибрациями трубопровода, изменениями температуры или турбулентностью потока. Эти фильтры могут интегрироваться в схему обработки сигналов, обеспечивая улучшение качества входных данных и надёжность результата.

Другим направлением является постобработка данных, полученных от расходомеров. Анализ временных рядов, включающий в себя методы статистической оценки, обнаружение выбросов и устранение аномалий, позволяет повысить достоверность измерений. Постобработка может быть реализована с использованием методов машинного обучения. Например, алгоритмы кластеризации или регрессии помогут выявить и учесть нестандартные условия работы, такие как деформация трубопровода или отложения на его внутренних стенках.

Цифровая обработка сигналов уже доказала свою эффективность в повышении точности измерений. Включение в структуру расходомеров более сложных схем, таких как многолучевые преобразователи, может дополнительно снизить гидродинамическую погрешность за счет более точной интерпретации эпюры скоростей. Дополнительно можно внедрить алгоритмы, способные автоматически компенсировать влияние температуры и вязкости жидкости, что позволит улучшить точность измерений в реальном времени.

Внедрение комбинации вышеупомянутых методов позволяет обеспечить не только высокую точность измерений, но и устойчивость к нестан-

дартным условиям 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. Герасимов С.И. Анализ инструментальных и методических составляющих погрешности жидкостного ультразвукового расходомера // Сборник тезисов докладов XX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», (Москва, 27-28 февраля 2014), НИУ «МЭИ». – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 2. 94 с.
3. Глушнев В. Д., Панов М. М. Тенденции совершенствования современных ультразвуковых расходомеров //Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2018. – №. 3. – С. 94-100.