

# ПРИМЕНЕНИЕ DSP-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД В КОРИОЛИСОВЫХ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРАХ "ЭЛМЕТРО"

Опубликовано в журнале АВТОМАТИЗАЦИЯ, ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИЯ И СВЯЗЬ В НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, 2013, №3  
А.В.Жестков (к.ф.-м.н., директор ООО «ЭлМетро-Инжиниринг», г.Челябинск)



**1. Цифровая обработка сигналов первичных преобразователей с применением сигнальных процессоров (DSP-технология) - важнейшее направление развития методов измерения расхода.**

Как известно, чувствительные элементы (первичные преобразователи) большинства измерительных приборов дают в своем выходном аналоговом сигнале лишь скрытую информацию об измеряемой физической величине. Для ее извлечения необходимо эти сигналы обработать с помощью вторичных приборов, т.е. произвести над ними целый ряд манипуляций, включающих в общем случае:

- Фильтрацию шумов и помех
- Усиление
- Компенсацию влияющих факторов (например, температуры)
- Линеаризацию на основе данных калибровки функции преобразования
- Формирование унифицированного выходного сигнала
- Преобразование аналогового сигнала в цифровой, если стоит задача передавать информацию по «полевым» шинам

Традиционные аналоговые датчики, даже если имеют «на борту» микропроцессор, выполняют эти операции в вышеуказанной последовательности чисто аналоговой электроникой и лишь на последнем этапе аналого-цифровой преобразователь (АЦП) придает уже готовой измерительной информации цифровой вид, пригодный для её передачи микропроцессором на дисплей, в систему управления и т.д.

Аналоговые датчики работали и работают надёжно, но имеют ограничения по метрологии, динамическому диапазону измерения и условиям применения. Аналоговая схема построения датчика не может обеспечить необходимую избирательность в фильтрации шумов и помех, не обладает гибкостью в воспроизведении требуемых передаточных характеристик и, в конечном счете, является лимитирующим фактором по точности.

Поэтому для всего спектра измерительной техники в течение последнего десятилетия наблюдает-

ся «цифровая революция». В новых приборах АЦП стоит уже на входе вышеупомянутой цепочки преобразований, т.е. оцифровываются непосредственно выходные сигналы чувствительных элементов, и все последующие действия совершаются в цифровом виде.

Для датчиков медленно меняющихся величин (температура, давление) такое построение удалось реализовать применением функционально законченных «систем на кристалле». При этом функции фильтрации и усиления в силу их универсальности для таких сигналов удалось реализовать аппаратно. Иными словами, вся сложность цифровой обработки оказалась спрятана в начинке серийно выпускаемых электронных микросхем.

Значительно сложнее обстоит ситуация с датчиками быстропеременных величин, к которым относятся и расходомеры, указанные в заголовке статьи. Для обоих типов приборов задача сводится к измерению временных интервалов с разрешающей способностью  $10^{-9}$  с и идентификации событий, определяющих эти интервалы. Это требует применения быстродействующих АЦП высокого разрешения и специальных микропроцессоров для обработки измерительных данных в режиме реального времени, в которых аппаратно реализованы дополнительные математические функции, - так называемых цифровых сигнальных процессоров (ЦСП или DSP, как принято обозначать в международной литературе). И это, конечно, требует разработки и применения специальных алгоритмов, позволяющих решить измерительную задачу «на лету» за минимальное время, укладывающееся в период обновления выходных данных расходомера (например, см.[1]).

В данной статье будет рассказано об инженерных решениях нашей компании, относящихся к цифровым технологиям измерений, в области наукоёмкой расходомерии.

**2. Опыт инженерной команды «ЭлМетро» в реализации сложных проектов измерительной техники для промышленности**

С 1996 года конструкторский коллектив нашей компании занимается разработкой промышленных измерительных приборов по заказу ведущих брендов российского приборостроения. За это время разработано более 20 типов изделий. Их общий объем выпуска за это время составил более миллиона единиц. Среди них: первые российские «интеллектуальные» промышленные датчики давления и температуры, линейка метрологического оборудования, среди которого первые российские электронные калибраторы и контроллеры давления, и другие.

Опираясь на накопленный опыт и собственную

производственную базу, наша компания с 2008 года развивает продуктовую линию под собственной торговой маркой «ЭлМетро». Она включает три основных направления:

- Аппаратура контроля и управления - видеографические регистраторы технологических процессов «ЭлМетро-ВиЭР», получившие широкое распространение в России и СНГ, а также регуляторы, HART-модемы, блоки питания;
- Метрология - линейка калибраторов дав-

ления «ЭлМетро-Паскаль» и многофункциональных калибраторов «ЭлМетро-Вольта» и «ЭлМетро-Кельвин», а также комплексные решения, т.е. стенды и даже метрологические лаборатории «под ключ»;

- Уникальные расходомеры, т.е. в той нише, где отечественные продукты либо отсутствуют, либо являются ребрендингом зарубежных изделий, - массовые кориолисовые расходомеры «ЭлМетро-Фломак» и ультразвуковые счетчики-расходомеры газа.



а)



б)

Рис.1 а) Массовый расходомер «ЭлМетро-Фломак»; б) «ЭлМетро-Фломак» в составе мобильной установки измерения сырой нефти.

### 3. Массомеры кориолисовые «ЭлМетро-Фломак» - реализованный проект с применением DSP-технологий

Уже прошло то время, когда кориолисовые расходомеры воспринимались, как экзотический и даже пугающий продукт. Потребители разобрались с принципами и особенностями их работы, осознали их преимущества. И уже сложилась практика, что если стоит задача измерять массовый расход, то эти приборы являются первым рассматриваемым вариантом решения.

И тем не менее, с точки зрения сложности и технологичности производства кориолисовые расходомеры остаются отнюдь не рядовым изделием. Причиной является сложность технологии, выражающаяся во множестве нюансов и технологических секретов, тщательно оберегаемых иностранными фирмами-изготовителями и дороговизной самого технологического оборудования для серийного производства. «Ноу хау» присутствуют как в ключевых процессах изготовления прибора, так и в алгоритмах цифровой обработки сигналов чувствительных элементов.

Поэтому разработанные нашей компанией кориолисовые расходомеры «ЭлМетро-Фломак» - это наукоёмкий импортозамещающий продукт и предмет особой гордости инженеров компании. Разработанная линейка расходомеров позволяет измерять массовый расход от 1 кг/час до 150 т/час, а также плотность, температуру и объёмный расход. Прибор сертифицирован и выпускается с 2011 года. И уже имеется достаточно большая установленная

база в нефтяной промышленности, в энергетике, в химии.

Рассмотрим основные параметры и конструктивные решения, выделяющие «ЭлМетро-Фломак» на фоне конкурентов.

а) **Стабильный сенсор.** Это прежде всего означает стабильность «нуля» показаний во времени и после нагрузок, связанных с прохождением потока измеряемой среды.

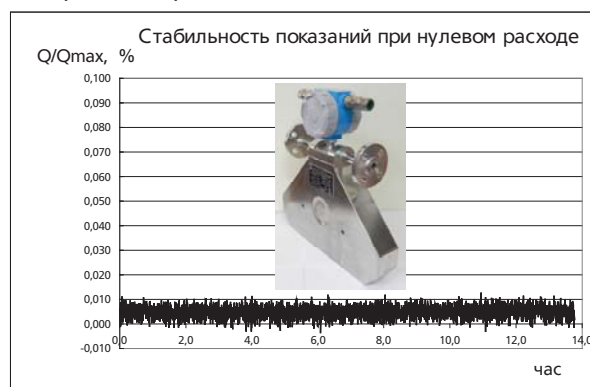


Рис.2 Временная зависимость показаний расходомера в отсутствие потока в приведённых единицах

Из данных, приведённых на рис.2 для самой младшей модели прибора (а это технически наиболее сложный вариант), видно, что «ноль» стабилен в пределах 0,01% максимального расхода прибора  $Q_{MAX}$ . Этим обеспечивается динамический диапазон по расходу не менее  $(10...100\%)Q_{MAX}$  с сохранением основной относительной погрешности.

**б) Цифровая схема управления чувствительным элементом** (см. рис.3). Ее применение позволяет измерять расход жидкости даже при значительном газовом факторе (при объемной доле газа до 1% - с сохранением основной погрешности; при объемной доле газа до 5% - с относительной погрешностью до 2%).

Дело в том, что, если имеются газовые включения, то традиционная аналоговая автоматическая регулировка усиления (АРУ) в канале генерации

колебаний измерительных трубок приводит к существенному искажению формы сигнала на катушке возбуждения кориолисового расходомера. Это приводит к неустойчивости колебаний трубок и нарушает работоспособность прибора.

В «ЭлМетро-Фломак» применена цифровая АРУ, обеспечивающая устойчивость колебаний и быстрое подавление переходных процессов, возникающих при появлении пузырьков газа в жидкости.

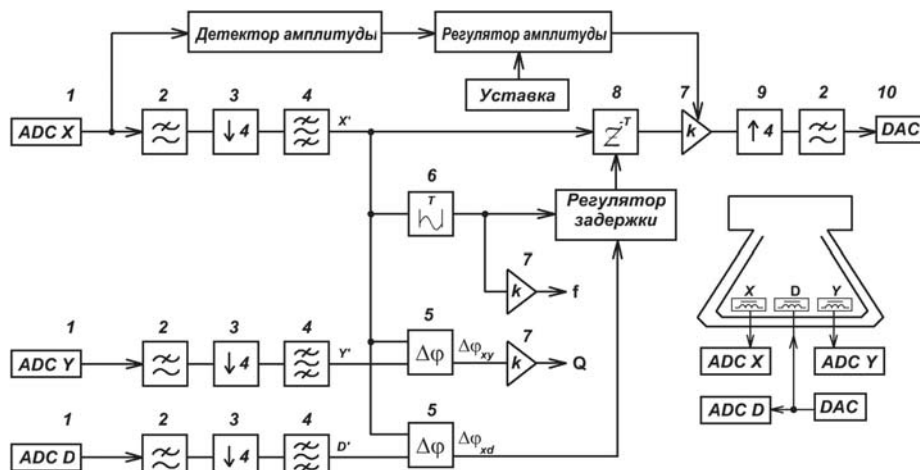


Рис.3. Структурная схема цифровой обработки сигналов в кориолисовом расходомере «ЭлМетро-Фломак»: 1 - аналогоцифровые преобразователи сигналов индукционных датчиков (X, Y) и на катушке возбуждения (D); 2 - цифровые фильтры низкой частоты; 3 - дециматор; 4 - полосовые фильтры; 5 - фазовые детекторы; 6 - измеритель частоты; 7 - усилители; 8 - блок формирования управляемой задержки; 9 - интерполятор; 10 - цифроаналоговый преобразователь сигнала возбуждения колебаний; Q - выходной сигнал массового расхода; f – сигнал частоты колебаний трубок.

**в) Цифровая фильтрация и специально разработанный алгоритм вычисления времени задержки DSP-процессором.** Это обеспечивает устойчивость расходомера к вибрациям. На рис.4 приведены сигналы одной из измерительных катушек расходомера в присутствии вибраций в «сыром» виде и после обработки цифровым фильтром.

Эффективное устранение помех в исходном сигнале позволило «очистить» и выходной сигнал, пропорциональный расходу. Достигнутая разрешающая способность определения времени задержки между сигналами индукционных датчиков X, Y составляет  $\sim 1 \cdot 10^{-9}$  с, что соответствует  $\sim 0,001\% Q_{MAX}$

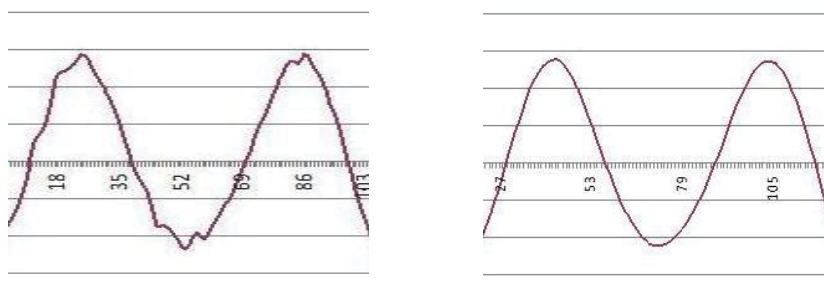


Рис.4. Эпюры сигнала индукционного датчика: слева - сильно искажённый вследствие внешних ударных воздействий; справа - восстановленный после цифровой фильтрации.

**г) Уникальный для «полевых» устройств локальный операторский интерфейс** делает обращение с прибором удобным и приятным. По-видимому, впервые реализована емкостная клавиатура во взрывозащищённом исполнении, работающая через 10 мм стекло. Она позволяет настраивать расходомер даже в опасной зоне, а графический дисплей

выдаёт многопараметрическую информацию в интуитивно понятном виде (не требуется запоминать условные обозначения параметров, как это обычно бывает с цифробуквенными дисплеями). При этом доступна опция с графическим OLED дисплеем, работающим до -40-С.



д) **Распределённое исполнение электроники**, т.е. разделение на измерительный модуль и трансмиттер, содержащий локальный операторский интерфейс. Так как связь между ними осуществляется по цифровому интерфейсу RS-485, это позволяет, расположив измерительный модуль на сенсоре или вблизи него, отнести трансмиттер с локальным операторским интерфейсом в любое удобное место, например в операторское помещение.

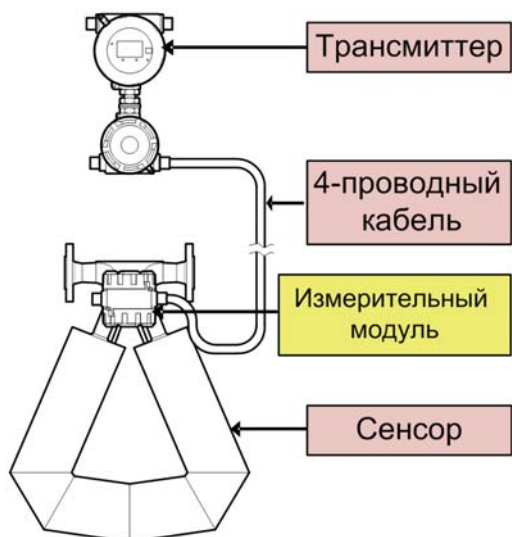


Рис.5 Исполнение электроники «ЭлМетро-Фломак» с вынесенным трансмиттером

е) **Исполнение для измерения расхода мазута** - температура процесса – до 250-С, давление - до 10 МПа

ж) **Универсальное питание прибора**, как от сети переменного тока 85...264 В, так и от источника постоянного напряжения 20...110 В с автоматическим переключением между ними.

з) **Встроенная функция дозатора** - отпадает необходимость во внешнем контроллере для простых систем дозирования

Линейка расходомеров «ЭлМетро-Фломак» по своим характеристикам уже сейчас находится на уровне продуктов уважаемых зарубежных фирм, но при этом более доступна для отечественных потребителей благодаря технической поддержке и готовности решать сложные вопросы применения кориолисовых расходомеров, вплоть до привлечения к их решению разработчиков приборов.

**4. Первые отечественные ультразвуковые счетчики-расходомеры газа на основе DSP-технологий – совместный проект группы компаний «ЭлМетро» и ОАО ИПФ «Сибнефтеавтоматика»**

Измерение потока газа является традиционно трудной задачей в расходомерии, поскольку многие стандартные для контроля жидких сред методы измерения неприменимы к газам, либо оказываются очень сложными (и дорогими) в реализации.

В последние годы резко возрос интерес к вре-

мяимпульсному ультразвуковому методу измерения расхода газов. Благодаря широкому динамическому диапазону (до 1:200) он оказался очень перспективен для измерения попутного нефтяного газа (ПНГ) – см. [2]. А высокая точность метода делает привлекательным его применение к измерению газа природного [3].

В применении к жидкостям ультразвуковой принцип хорошо и уже давно развит, однако для газовых сред до сих пор является экзотикой. Это обусловлено следующими объективными причинами:

- чрезвычайно низкий коэффициент прохождения ультразвука через границу газ-твердое тело;
- обусловленное этим малое отношение сигнал-шум в акустическом канале, что делает возможность измерения проблематичной;
- чувствительность приборов к загрязнениям и включениям, особенно при применении к ПНГ.

Без решения этих принципиальных проблем невозможно создание работоспособного газового расходомера на ультразвуковом принципе. И инженерами «ЭлМетро» эти решения были найдены и реализованы в новых счетчиках-расходомерах газа СГУ:

- специальная конструкция ультразвуковых преобразователей с согласующим слоем и акустической изоляцией активной части излучателя от корпуса;
- применение цифровой обработки сигнала на базе DSP-процессоров для выделения полезного сигнала из шумов;
- переход на низкие частоты ультразвука – это увеличивает его проникающую способность, но предъявляет дополнительные требования к качеству цифровой обработки сигнала для сохранения разрешающей способности.

В результате была создана линейка ультразвуковых счетчиков-расходомеров СГУ, основные харак-



Рис.6 Ультразвуковой расходомер газа

теристики и конструктивные решения которой приведены ниже:

- Типоразмерный ряд, условные диаметры – от 50 до 300 мм;
- Расход газа в рабочих условиях – от 2 до 7600 м<sup>3</sup>/ч;
- Динамический диапазон по расходу 1:150 для каждого представителя типоразмерного ряда;
- Одно- и двухлучевое исполнения без использования отражения от стенок;

д) Предел основной относительной погрешности в рабочих условиях – 1 % для двухлучевой схемы, 1,5% - для однолучевой;

е) Предел основной относительной погрешности измерения расхода газа, приведенного к нормальным условиям – 2 % для двухлучевой схемы, 2,5% - для однолучевой;

ж) Рабочее избыточное давление – от 0 до 1,6 МПа;

з) Локальный операторский интерфейс с графическим дисплеем и емкостной клавиатурой, позволяющей осуществлять настройку прибора во взрывоопасной зоне;

«Заглянем внутрь» расходомера и рассмотрим временные развертки сигнала, выделенного прием-

ником из акустического тракта. На рис.7 изображена форма принятого сигнала в идеальных условиях и в присутствии помехи от компрессора в рабочей полосе частот. Для аналоговых ультразвуковых расходомеров (УЗР) подобная помеха приводит к смещению момента детектирования пришедшего импульса и нарушению работоспособности. Именно по этой причине традиционные УЗР столь чувствительны, например, к присутствию частотных преобразователей, широко распространенных в настоящее время. Однако цифровая электроника «ЭлМетро» счетчиков-расходомеров СГУ позволяет специальными алгоритмами, реализованными на цифровых сигнальных процессорах (DSP), распознать эти помехи и устранить их влияние на результат измерений.

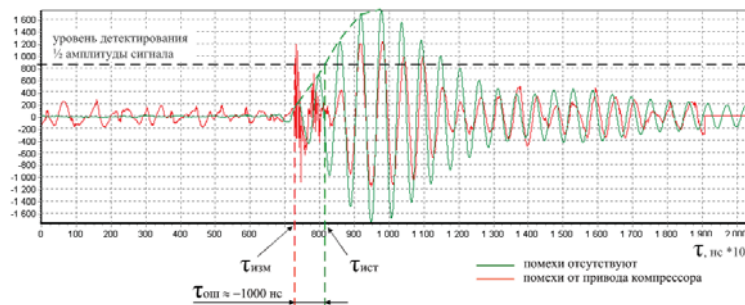


Рис.7 Принятый сигнал в отсутствие и при наличии помех

Другая ситуация, чреватая ошибками измерения, приведена на рис.8. В зависимости от скорости потока, огибающая принятого импульса может изменять свою форму, что приводит вновь к ошибкам изме-

рения в аналоговых устройствах. При цифровой же обработке сигнала происходит детальный его анализ и ложные смещения момента детектирования устраняются.

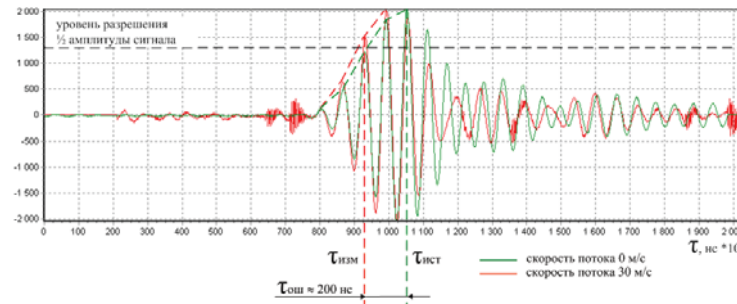


Рис.8 Изменение огибающей принятого сигнала (сравнение при нулевой и максимальной скорости потока).

В итоге, реализованный алгоритм обработки позволил не только устранить влияние помех, но и достичь эффективной разрешающей способности измерения времени прохождения импульса на уровне одной наносекунды. Для расходомера с условным диаметром 100 мм это соответствует чувствительности к скорости потока ~5 мм/с.

Суммируя возможности ультразвуковых счетчиков-расходомеров газа СГУ, реализованные на основе цифровых технологий и аппаратной базе сигнальных процессоров, можно выделить следующие перспективные области их применения:

- Счетчики попутного, в т.ч. факельного газа
- Счетчики природного газа
- Счетчики технологических газов (аргон, сжатый воздух, углеводороды, азот и др.)

- Узлы коммерческого учета газа на предприятиях

Счетчики-расходомеры СГУ прошли испытания и материалы направлены на утверждение типа средств измерений. Начало производства – II квартал 2013 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M.P.Henry, D.W.Clarke, J.H.Vignos. Digital flowmeter.- US Patent 8,000,906,B2, Date 08.16.2011
2. ГОСТ Р 8.733-2011. Системы измерений количества и параметров свободного нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования
3. СТО Газпром 5.2-2005. Расход и количество природного газа. Методика измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода