

## ЦИФРОВОЙ КОРИОЛИСОВЫЙ РАСХОДОМЕР Foxboro® - ПРЕДСТАВИТЕЛЬ КОНЦЕПЦИИ SEVA

А.Н. Крошкин (ООО «Инвенсис Проуэсс Системс»)

*Рассмотрены основные положения концепции «самоконтролируемых» или «самоаттестуемых» приборов SEVA (SEnsor-VALidation). Показана реализация этой концепции в промышленном цифровом кориолисовом расходомере Foxboro.*

*Ключевые слова: самоконтролируемые, самоаттестуемые приборы, кориолисов расходомер, интеллект, время отклика, трансмиттер.*

Начиная с 1988 г. Департамент прикладной науки университета в г. Оксфорде разрабатывает концепцию «самоконтролируемых» или «самоаттестуемых» приборов, которая получила название SEVA (SEnsor-VALidation). Разработки финансируются правительством Великобритании и самой приборостроительной промышленностью. Концепция SEVA с 2001 г. утверждена в Великобритании как национальный стандарт BS-7986 и с тех пор получила широкое развитие в промышленности. Философия SEVA подразумевает, что прибор оценивает качество выполняемых измерений на базе своих внутренних параметров. При этом он не только маркирует измерение как «достоверное» или «ненадежное», но и принимает все меры для того, чтобы повысить его качество. В структуре упомянутого Департамента функционирует университетский технологический центр компании Инвенсис, специалисты которого одними из первых создали прототип, а затем и промышленный прибор в рамках концепции SEVA. Им стал полностью цифровой кориолисовый расходомер Foxboro® нового поколения, который появился на рынке в 2002 г. и с тех пор удерживает лидирующие позиции.

С момента появления первого измерительного прибора со встроенным микропроцессором функциональные возможности средств измерений неуклонно повышаются. Развитие современной техники идет как в направлении увеличения объема и повышения качества измерительной информации, так и в области предоставления многочисленных полезных пользовательских функций, таких как самодиагностика, автоматический выбор диапазонов, развитые средства отображения и передачи информации, дистанционное управление, Web-интерфейс и т. п. При автономном использовании подобного средства измерений все выгоды от его «интеллекта» налицо. Однако, если рассматривать прибор в составе АСУТП, то не все так очевидно. Парадокс заключается в том, что наличие ряда очень «умных» приборов в составе АСУТП практически не добавляет «интеллекта» самой системе в целом. Проявления «интеллекта» у приборов настолько разнообразны и разноплановы, что автоматизированная система не знает как их интерпретировать и использовать. Попытки унифицировать поведение современных приборов в составе АСУТП начали предприниматься более 20 лет назад, и одной из таких разработок стала концепция SEVA.

Промышленный прибор может рассматриваться с двух точек зрения: для сервисного инженера это некий компонент, подлежащий техобслуживанию,

в то время как для оператора это источник данных о процессе. В первом случае важна информация об отклазе, во втором — качество измерений. В настоящее время большинство современных приборов имеет функцию самодиагностики и при возникновении проблем генерирует специфический код ошибки. С точки зрения техобслуживания код ошибки — это адекватное описание проблемы. Но с функциональной (операционной) точки зрения реакция АСУТП на код ошибки является проблематичной. Если представить большую систему, например с 15 типами приборов от 10 различных вендоров, каждый из которых воспроизводит 20 различных кодов ошибки, то задача генерации адекватной реакции системы на каждый код ошибки становится неподъемной. Вопрос о том, что более важно для АСУТП: данные диагностики (исправность) приборов или качество измерений — остается достаточно спорным. Это связано с тем, что функционирование автоматизированного промышленного объекта зависит не столько от «физического здоровья» приборов, но, прежде всего, от качества производимой ими измерительной информации. При этом взаимосвязь между техническим отказом прибора и погрешностью измерения может быть неочевидной. Если прибор измеряет несколько величин, то одна и та же нештатная ситуация может влиять на различные измерения по-разному. Например, кориолисовый расходомер (КР) измеряет массовый расход, плотность и температуру. Появление свободного газа в жидкости (обычно у всех КР сопровождается генерацией кода ошибки) оказывает отрицательное влияние на измерения расхода и плотности, но никак не сказывается на измерении температуры. Следует также заметить, что генерация кода ошибки не всегда связана с необходимостью техобслуживания. В вышеприведенном примере с расходомером ничего не случилось, его обслуживать не надо, в то время как измерение расхода и плотности стало недостоверным. Бывают и обратные случаи, например, внутренняя протечка в датчике. Измерение параметра (давления, температуры и т. п.) до поры до времени вполне корректное, однако датчик требует срочного обслуживания.

Если производитель прибора поддерживает только генерацию сервисного кода ошибки, то пользователь прибора, как правило, лишен информации о последствиях какого-либо «кодированного» отказа для измерений. Даже если пользователю доступна какая-то часть компетенции вендора относительно устройства прибора, задача увязки кода ошибки с качеством измерений остается проблематичной. В этой связи более подходящим источником информации является сам

прибор, который, обладая некоторой долей «интеллекта», по своим внутренним параметрам может произвести детальный анализ нештатной ситуации и оценить ее влияние на результат своего измерения. Вопрос состоит в том, что может быть использовано вместо традиционного кода ошибки.

Как альтернатива коду ошибки может рассматриваться так называемый индикатор достоверности (Validity Index — VI) для каждого измерения, который может быть использован АСУТП для принятия операционного решения при любом типе отказа. В различных схемах управления предлагаются различные виды VI, но имеется ряд общих соображений на этот счет. Во-первых, чтобы избежать трудностей с интерпретацией кодов ошибок, желательно, чтобы VI был универсальным и не зависел от типа прибора и вендора. Также VI должен быть информативным, чтобы различать различные уровни или степени того или иного

состояния. Еще желательно, чтобы VI обладал свойством прослеживаемости, то есть позволял оценивать и качество производных (косвенных) измерений. Например, известны результаты измерений от прибора А с индикатором VIa и от прибора В с индикатором VIb, которые подаются на преобразователь С. Каков будет VIc на выходе преобразователя? Простейшим видом VI является так называемый однобитовый VI, то есть индикатор «хорошее»/«плохое» измерение, который по понятным причинам не удовлетворяет приведенным выше пожеланиям.

Рассмотрим подход к решению данной проблемы, принятый в концепции SEVA [1]. Помимо обязательной индикации достоверности (то есть генерации VI), отправной точкой SEVA является коррекционная стратегия измерений. Она означает, что SEVA-прибор должен производить наилучшую оценку измеряемой величины в любой момент времени, даже при наличии нештатной ситуации, и сопровождать такую оценку соответствующим VI, отражающим качество такой оценки. Поясним это на примере (рис. 1). Для простоты используем однобитовый VI «хорошее»/«плохое». Имеем исходное «сырое» измерение RMV (Raw Measurement Value) и скорректированное измерение на выходе прибора VMV (Validated Measurement Value). При некоррекционной стратегии измерений (рис. 1a) прибор транслирует на выход то, что есть. То есть  $VMV=RMV$ , но при этом прибор честно предупреждает с помощью VI, что измерение на определенном интервале «плохое». На рис. 1b

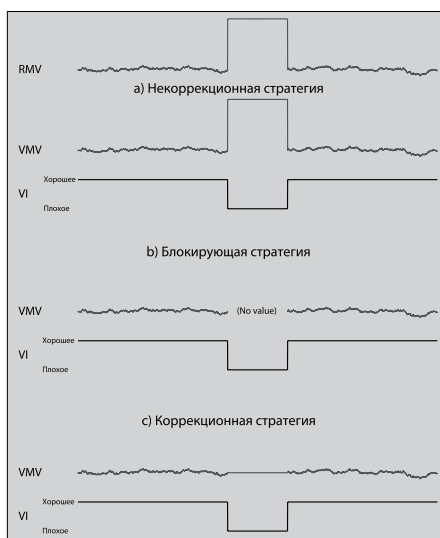


Рис. 1. Стратегии измерения SEVA-прибора: а) некоррекционная, б) блокирующая, в) коррекционная

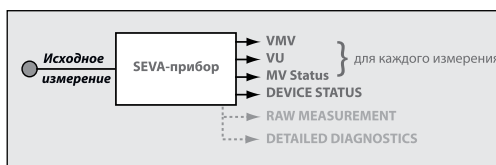


Рис. 2. Индикаторы достоверности (VI), генерируемые SEVA-прибором

и его производителя. На рис. 2 показаны параметры, генерируемые типичным SEVA-прибором. Скорректированное измерение VMV сопровождается двумя индикаторами: Validated Uncertainty (VU), то есть неопределенностью, и Measurement Value Status (MV Status), то есть статусом конкретного измерения. MV Status информирует АСУТП как было получено текущее значение VMV. Важно, что VU и MV Status сопровождают каждое VMV. Кроме того, генерируется сигнал статуса прибора (DEVICE STATUS), который отражает общее «физическое здоровье» устройства. Также предполагается, что может быть доступно «сырое» нескорректированное измерение RAW MEASUREMENT. И наконец, детализированная диагностическая информация (DETAILED DIAGNOSTICS) так же, как и прежде при необходимости доступна для сервисного инженера. Что касается неопределенности, то это понятие специфицировано в многочисленных национальных и международных стандартах и обычно рассчитывается как фиксированная величина для конкретного прибора и конкретной измерительной задачи. В концепции SEVA неопределенность рассчитывается для каждого измерения, то есть имеет динамический характер. Другими словами, пока измерение не корректируется ( $VMV=RMV$ ), неопределенность имеет то же значение и тот же смысл, что и в традиционном понимании. Но как только зафиксирован отказ, и прибором применена коррекция измерения ( $VMV \neq RMV$ ), неопре-

приведена так называемая блокирующая стратегия измерений, при которой прибор на интервале «плохого» измерения просто блокирует свой выход (результата измерения нет вообще). Коррекционная же стратегия (рис. 1 в) предполагает, что «плохое» измерение замещается наилучшей возможной оценкой, которую сам прибор генерирует на основе своих внутренних параметров с помощью своего «интеллекта».

Согласно концепции SEVA, в случае отказа прибор оценивает его влияние на каждое измерение и при необходимости корректирует (оценивает) ситуацию наилучшим возможным способом. При этом генерируются индикаторы достоверности VI, описывающие результирующее качество измерения в универсальной «вендор-независимой» форме. Это позволяет АСУТП выработать адекватное управляющее воздействие в ответ на любую нештатную ситуацию вне зависимости от типа прибора

деленность увеличивается, что отражает пониженное качество скорректированного значения относительно «живого» измерения.

Технологический центр компании Инвенсис при Оксфордском университете более 20 лет занимается разработкой промышленных средств измерений в рамках концепции SEVA. Первой и наиболее яркой реализацией данных исследований стал промышленный КР Foxboro®, появившийся на рынке как первый полностью цифровой КР. Научные разработки и конструкторские решения, примененные в КР Foxboro®, защищены более чем 20 патентами США и Великобритании и долгое время открыто не публиковались. И хотя некоторые из примененных решений на се-

годняшний день уже не являются ноу-хау, цифровой КР Foxboro® в целом остается образцом инновационного подхода в промышленных измерениях. Цифровой промышленный КР получил две основные отличительные особенности. Первая — это самое малое (из присутствующих на рынке КР) время динамического отклика. Второе достижение — КР Foxboro® «научился» приемлемо работать на двухфазных средах, при этом сохраняя не только работоспособность в присутствии свободного газа, но и вполне приемлемые для многих применений метрологические характеристики. Это является практическим воплощением коррекционной стратегии измерений, принятой в концепции SEVA.

Начнем с времени отклика или динамических свойств КР. Еще 10 лет назад учеными Брунельского университета было проведено исследование [2], в ходе которого было установлено, что время отклика проточной части КР на скачкообразное изменение потока не может быть детектировано быстрее, чем один полный цикл колебательного движения измерительных трубок. Другими словами, если сенсор осциллирует на частоте 100 Гц, он физически не может откликнуться быстрее чем за 10 мс. Конструкция сенсора также имеет значение. Прямая геометрия сенсора (в отличие от изогнутой) ведет к более высокой частоте осцилляции. И если более высокая частота (скажем, 800 Гц вместо 80 Гц) позитивна с точки зрения времени отклика, то меньшая амплитуда сигнала (например, 30 мВ вместо 300 мВ) и меньшее значение фазового сдвига (например,  $0,4^\circ$  вместо  $4^\circ$ ) приводит к ухудшению отношения сигнал/шум. Низкое отношение сигнал/шум требует применения дополнительной фильтрации входного сигнала, которая также является источником задержки. В промышленных применениях показателем дина-

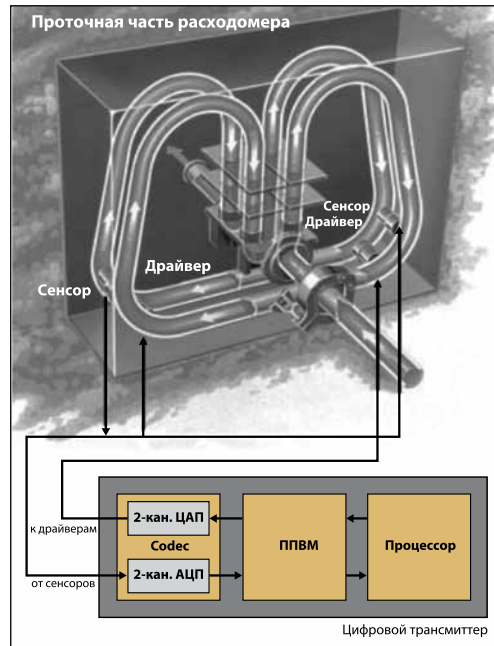


Рис. 3. Структурная схема цифрового кориолисового расходомера Foxboro®: проточная часть и цифровой трансмиттер

ческого отклика считается значение времени от физического скачка потока до появления соответствующего сигнала на одном из стандартных выходов, например, токовым 4...20 мА, частотном/импульсном или цифровой шине (Profibus, FF, HART и др.). При этом обновление выходов необязательно производится при каждом цикле измерений. Типовые промышленные КР обычно обновляют выходы каждые 100 мс, что согласуется с типовой частотой сканирования приборов в АСУТП (порядка 10 Гц). Так как циклы чтения и обновления выходов не совпадают, то среднюю задержку от цикла измерения до получения информации в АСУТП можно считать примерно равной 50 мс. Кроме того, выходной сигнал в приборе зачастую фильтруется, а постоянная времени фильтров составляет 40...1000 мс, поэтому такие фильтры часто являются основным источником задержки. Далее, сами выходы имеют ограничения: если отклик тока на выходе 4...20 мА является условно мгновенным, то импульсный выход чаще всего принято обновлять только с каждым новым фронтом импульса. Обычно максимальная частота для таких выходов не превышает 10 кГц, а нулевой расход программируется равным 0 Гц. Поэтому на низких расходах задержка до следующего фронта импульса может составлять несколько миллисекунд. Современные цифровые шины (Profibus, FF) допускают передачу значений с плавающей запятой, то есть практически без потери точности, но в типовых промышленных системах такая передача осуществляется не чаще чем раз в 100 мс. Таким образом, суммарное время отклика на скачок процесса может быть довольно существенным.

Оксфордская исследовательская группа компании Инвенсис разработала быстродействующий импульсный/частотный выход в рамках концепции нового цифрового трансмиттера (рис. 3). Трансмиттер, возбуждающий В-образную измерительную трубку с собственной частотой около 80 Гц, реализует циклы управления и измерения каждые полпериода, то есть с частотой 150...200 Гц. (Сразу отметим, что трансмиттер может управлять и другими проточными частями, в том числе прямотрубными, с частотой колебаний до 1 кГц). Он имеет в своем составе 32-битный процессор с аппаратной поддержкой операций с плавающей запятой, ППВМ — программируемую пользователем вентильную матрицу, и третий основной компонент — стерео аудиокодек, поддерживающий двухканальные ЦАП и АЦП на частоте 40 кГц, которые используются для связи с драйверами и сенсорами

измерительной трубки соответственно. Хотя кодек производит выборки на частоте 40 кГц, групповая задержка составляет 61 цикл, то есть 1,5 мс. Затем фильтр нижних частот, реализованный в ППВМ, дает 1 мс задержки. Для типовой частоты возбуждения 80 Гц, каждые полцикла необходимо около 6 мс для сбора данных. Процессору требуется дополнительно 1,5 мс для вычисления измеряемых значений. Импульсный выход обновляется на каждом цикле измерений, и скачок потока передается на выход практически мгновенно (<1 мс) даже на низких расходах. Высокоточные вычисления, а также цифровая генерация сигнала возбуждения, не требуют дополнительной фильтрации выходного сигнала. Таким образом, теоретическое время задержки от сигнала сенсора до импульсного выхода составляет 10...16 мс в зависимости от того, в какой фазе колебания трубки произойдет скачок. Такая оценка коррелируется с теоретическим Брунельским лимитом для частоты 80 Гц и подтверждается экспериментальными результатами (рис. 4).

Теперь рассмотрим работу цифрового КР на двухфазном потоке. Она зависит от правильных колебаний измерительной трубки (или двух трубок в зависимости от дизайна проточной части), которые управляются сигналом возбуждения, генерируемым передатчиком. Функционирование считается оптимальным, если трубка вибрирует на естественной (резонансной) частоте и с постоянной амплитудой. Поскольку измерительный алгоритм подразумевает постоянную амплитуду в течение цикла вычислений, стабильность

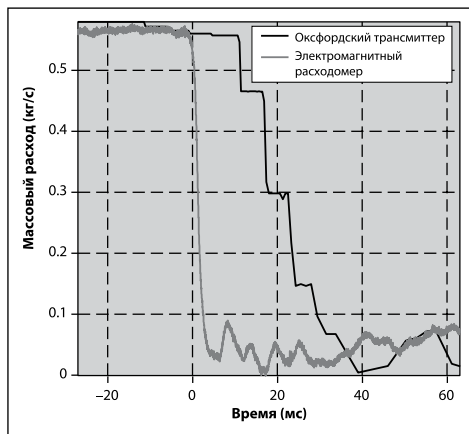


Рис. 4. Экспериментальное время отклика Оксфордского цифрового передатчика

в усилителе на некий коэффициент. Коэффициент усиления пропорционален механическому демпфированию, которое в свою очередь зависит от упругости измеряемой среды. Цепь положительной обратной связи легко реализуется, но не обеспечивает полного контроля за формой сигнала и «пропускает» нежелательные компоненты сигнала сенсора (например, другие модели вибрации) в сигнал драйвера. При появлении двухфазного потока система возбуждения на базе положительной обратной связи склонна к дестабилизации и полной остановке. Демпфирование, численным выражением которого является отношение тока драйвера к сигналу сенсора, в присутствии двухфазного потока может увеличиться на два порядка и более и при этом быстро варьируется. Большие скачки амплитуды могут привести к срыву системы слежения за фазой. Кроме того, есть проблемы и с поддержанием самой амплитуды колебаний. Цепь возбуждения драйвера должна быть искробезопасной, то есть имеет ограничения по току, например 100 мА. Именно это ограничение считается причиной того, что обычные

амплитуды колебаний непосредственно влияет на качество измерений. Оптимальный сигнал драйвера должен точно совпадать по частоте и фазе с сигналом сенсора, а амплитуда выбираться таким образом, чтобы поддерживать постоянной амплитуду сигнала сенсора. Самой распространенной техникой генерации сигнала возбуждения является цепь усиления с положительной обратной связью, при которой входной сигнал сенсора, содержащий информацию о правильной частоте и фазе, умножается

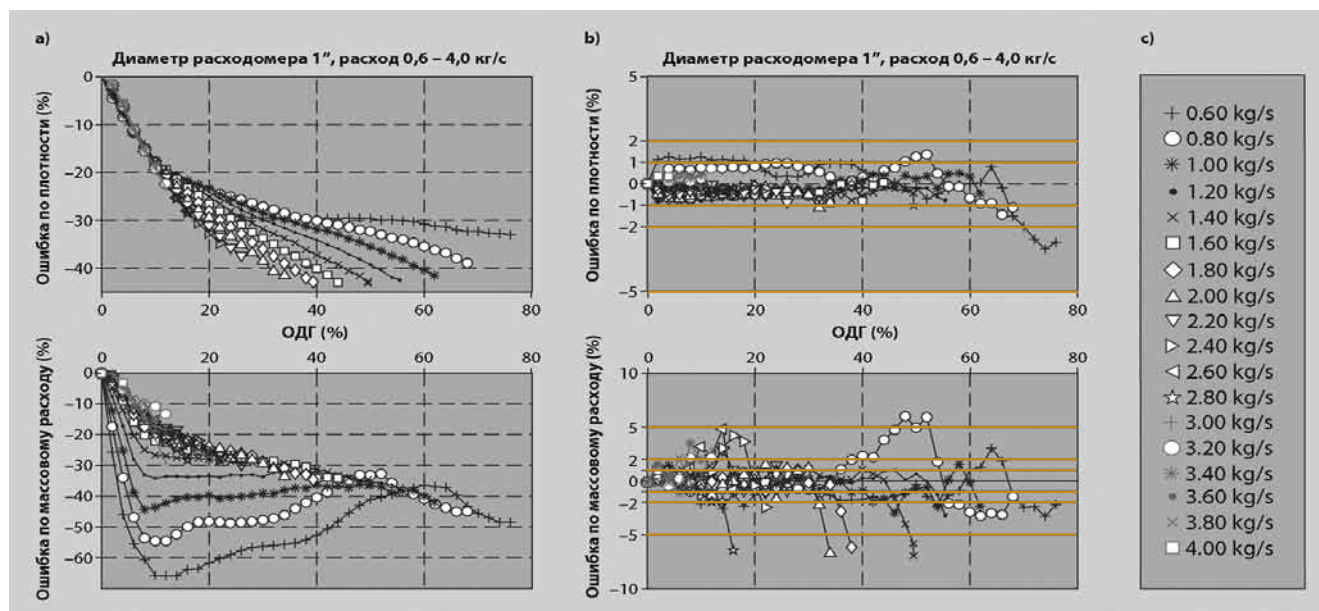


Рис. 5. а) Исходные погрешности измерения массового расхода и плотности, вызванные двухфазным потоком, б) погрешности измерения массового расхода и плотности после коррекции в реальном масштабе времени, в) значения расходов

КР на двухфазном потоке «встают». Однако это ошибочное мнение, так как причиной остановки чаще всего является не достижение предельно допустимого тока драйвера, а переход аналогового усилителя в режим насыщения. Другими словами, в усилителе достигается максимально возможный коэффициент усиления между сигналом сенсора и сигналом драйвера, но его все равно не хватает для поддержания необходимой амплитуды входного сигнала.

В трансмиттере Foxboro® система генерации сигнала возбуждения полностью цифровая и реализована большей частью аппаратно в ППВМ, ее детальное рассмотрение оставим за рамками данной статьи. Отметим лишь, что в совокупности с малым временем отклика (о чем говорили выше) она позволяет трансмиттеру поддерживать колебания измерительной трубки и необходимую амплитуду входного сигнала даже при значительной объемной доле газа (ОДГ) — до 70% и выше. Однако в условиях двухфазного потока поддержания колебаний измерительной трубки недостаточно для качественного измерения, так как погрешности измерения массового расхода и плотности с увеличением ОДГ возрастают катастрофически. Пример влияния ОДГ на погрешности измерений на различных расходах приведен на рис. 5 а. Вот здесь SEVA-прибор и проявляет свой «интеллект», реализуя коррекционную стратегию измерений (рис. 1), согласно которой прибор, «почувствовав» нештатную ситуацию, должен принять все меры, чтобы восстановить «правильное» измерение VMV. Алгоритм восстановления основан на том, что кривые, приведенные на рис. 5 а, имеют достаточную степень воспроизводимости для конкретного дизайна и типоразмера сенсора. Они также связаны с некоторыми параметрами, которые индицируют появление свободного газа и доступны прибору для наблюдения внутри себя. К числу таких параметров, помимо самих измеряемых значений расхода и плотности, относится демпфирование (ток драйвера/сигнал сенсора), потеря плотности, рассинхронизация сигналов сенсоров и др. Однако зависимость наблюдаемых параметров и результирующего эффекта, показанного на рис. 5а, достаточно сложна и не поддается математическому описанию. Для ее восстановления Оксфордская группа использовала метод искусственных нейронных сетей [3]. С математической точки зрения данный метод представляет многопараметрическую нелинейную задачу восстановления зависимостей, но в отличие от обычных математических моделей, которые программируются, нейронные сети обучаются на экспериментальных данных. Не будем в контексте данной статьи рассматривать технологии нейронных сетей, отметим лишь результат их имплементации в цифровой трансмиттер. На рис. 5b показаны остаточные погрешности восстановленных трансмиттером измерений VMV. По плотности остаточные погрешности практически полностью укладываются в диапазон  $\pm 2\%$ , по массовому расходу  $\pm 5\%$ . Естественно, пока

речь не идет о полном восстановлении паспортных метрологических характеристик, приписанных КР для однофазной среды, но сравнение VMV на рис. 5b с RMV на рис. 5а достаточно красноречиво. Излишне также добавлять, что КР, как истинный SEVA-прибор, для каждого восстановленного значения расхода и плотности рассчитывает неопределенность VU, которая может быть использована системой управления как индикатор точности текущих измерительных данных и работы управляющих воздействий.

Выдающиеся свойства цифрового КР Foxboro® предопределили эффективность его применения для многих специфических измерительных задач, где традиционные КР оказываются малоэффективными. Быстрое время отклика позволило значительно повысить точность операций дозирования в режимах старт/стоп. Это находит применение во многих отраслях индустрии, начиная от расфасовки продуктов питания и кончая бункеровкой океанских судов. Экономические эффекты от устранения недоливов/переливов в крупных портах иногда исчисляются астрономическими цифрами. Способность расходомера Foxboro® выполнять приемлемые измерения в присутствии газа оказалась востребована как для ряда экзотических сред, так и для обычного молока, которое при перегрузке имеет привычку пениться и создавать проблемы для обычных КР. Технология искусственных нейронных сетей получила дальнейшее развитие для трехфазных и даже четырехфазных потоков, что нашло воплощение в новом продукте компании Инвенсис — многофазном расходомере NetOil&Gas, применяемом для измерения в реальном времени дебитов нефтяных скважин. Об этом уникальном изделии будет рассказано в отдельной публикации.

В заключение отметим, что «интеллект», как и другие характеристики современных средств измерений, не должен развиваться стихийно, а требует определенного уровня унификации. Только в этом случае «интеллект» отдельных приборов может быть трансформирован в «интеллект» системы управления более высокого уровня. Помимо британского стандарта BS-7986, SEVA-подобная идеология получила развитие и в ряде других документов, например, в Директиве NE107 NAMUR, а также в МИ2021-89, разработанных ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

#### Список литературы

1. Henry M., Wood G. Sensor validation: principles and standards // *atp International* 3 (2005). No. 2. pp. 39-52.
2. Cheesewright R., Clark C., Belhadj A., Hou Y.Y. The dynamic response of Coriolis mass flow meters // *Journal of Fluids and Structures*. Vol. 18. pp. 165-178. 2003.
3. Lui R.P., Fuent M.J., Henry M.P., Duta M.D. A neural network to correct mass flow errors caused by two phase flow in a digital Coriolis mass flowmeter // *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*. Vol. 12. pp. 53-63. 2001.

**Крошкин Алексей Николаевич** — канд. техн. наук, менеджер направления, ООО «Инвенсис Проусесс Системс». Контактный телефон (495) 663-77-73 (доб. 109). E-mail: alexey.kroshkin@invensys.com