

2. Елкин Г. А. и др. Опыт длительной эксплуатации МЦР102 и МЦР103 в составе Госэталоны // Метрология времени и пространства: Труды 5-го Всерос. симп. Менделеево, 1994. С. 116—119.

3. Бойко А. И. и др. Исследование МЦР102 после его модернизации // Исследования по метрологии времени и

пространства: Труды ВНИИФТРИ. 2005. Вып. 50. С. 79—86.

4. Guinot B., Azoubib J. Comparison of primary frequency standards // Proc. Fourth symp. on frequency standards and metrology. Ancona, Italy, 1988. P. 37—42.

Дата принятия 01.06.2012 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.26.077.2

Системы поверки кориолисовых расходомеров

М. Ю. МИХЕЕВ*, К. В. ГУДКОВ*, В. А. ЮРМАНОВ*, Н. К. ЮРКОВ**

* Пензенская государственная технологическая академия, Пенза, Россия,
e-mail: mix1959@gmail.com

** Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Предложен способ поверки кориолисовых расходомеров на месте их эксплуатации. Рассмотрены конструкция системы, принципы работы, результаты моделирования воздействия импульсных помех.

Ключевые слова: кориолисов расходомер, поверка, грубые искажения результатов измерений.

A method of Coriolis flow meters' on-site verification is suggested. The system's design, operation principle and pulse interferences' influence simulation are considered.

Key words: Coriolis flow meter, verification, gross distortion of measurements results.

В настоящее время массовые расходомеры Кориолиса часто используют для контроля транспортировки и взвешивания налоговых пошлин по результатам измерений расхода многих различных жидкостей, в частности, сжиженного нефтяного газа и других углеводородов. Для этих областей применения измерительное устройство должно иметь погрешность 0,5 % или даже 0,1 %.

Использование систем на основе гравиметрического дивертора для поверки расходомеров представляет собой относительно трудоемкий и дорогостоящий процесс, а сами измерительные стенды относительно громоздки. С меньшей точностью, но проще процедура поверки с применением эталонных измерительных устройств, поверяемых на гравиметрических системах и используемых при калибровке относительно менее точных измерительных устройств. Большинство современных способов поверки содержит операцию извлечения поверяемого расходомера из трубопровода, в котором он работает. При поверке расходомеров на месте их работы необходима автоматическая компенсация внешних влияний, действующих на точность и воспроизводимость результатов: механического воздействия на измерительное устройство; конфигурации трубопровода; изменения свойств и состава жидкости и окружающей среды.

В способе, предложенном в [1] для поверки любых расходомеров в рабочих условиях эксплуатации, используется поверочное устройство, содержащее два идентичных эталонных массовых расходомера на основе эффекта Кориолиса,

включенных в трубопровод последовательно (рис. 1). Результаты поверки получают после обработки информации от трех указанных расходомеров.

Рассмотрим особенности использования такой схемы.

Во-первых, с целью минимизации погрешности при подсчете импульсов и обеспечения воспроизводимости результатов, поступающих с выхода измерительных устройств на базе двух поверочных и одного поверяемого кориолисовых расходомеров, каждая серия поверок должна иметь длительность 1—2 мин. Это предполагает высокую стабиль-

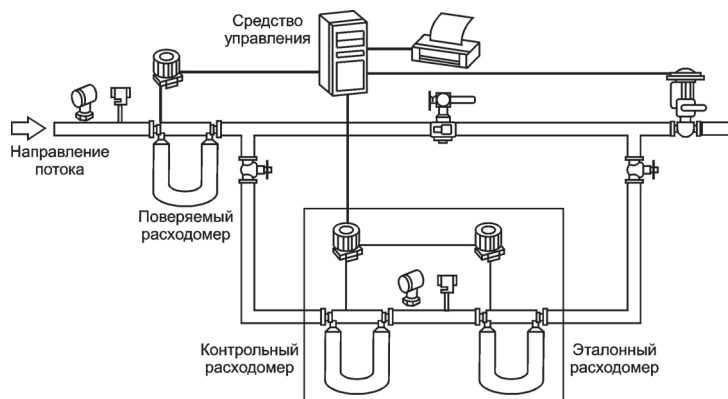


Рис. 1. Устройство поверки расходомеров на основе эффекта Кориолиса

ность параметров измеряемого потока вещества в течение указанных интервалов времени, что для промышленной насосной установки трудно выполнимо.

Во-вторых, в процедуре поверки участвуют два, по существу идентичных, поверяющих расходомера. Они откалиброваны на специальной установке с погрешностью в три раза ниже, чем у поверяемого расходомера, и цена деления таких расходомеров примерно на порядок меньше, чем у поверяемого. При обработке информации используют показания только эталонного расходомера, а показания второго — только в операции определения достоверности показаний первого расходомера. Такой подход противоречит общим положениям теории измерений.

Особую сложность представляет учет реакции измерительной системы на импульсные помехи. Для поверяющих расходомеров, имеющих в три раза меньшую погрешность, можно ожидать увеличения аномальных результатов измерений.

В-третьих, поверяющие расходомеры, смонтированные на общем основании, подсоединяют к трубопроводу в месте, расположенном выше или ниже по течению потока относительно поверяемого расходомера. Собственно трубопровод подвергается вибрационному механическому воздействию со стороны поверочной установки, что приводит к увеличению погрешности измерений. Подсоединение поверяющих расходомеров только с одной стороны равносильно определенному демпфированию вибраций именно с этой стороны. Такое отличие приведет к смещению оценок калибровочного коэффициента измерения массового расхода поверяемого расходомера.

В-четвертых, в любом расходомере на основе эффекта Кориолиса происходит колебание расходомерной трубки на резонансной частоте. В силу различных причин, описанных, например, в [2–4], узловые точки этого колебания перемещаются по конструкции расходомера. Таким образом, контрольный и эталонный расходомеры являются источниками дополнительного вибрационного воздействия, причем на близких, по существу равных резонансных частотах. Следовательно, возникает взаимовлияние двух (или трех) устройств, работающих на одной резонансной частоте. Теоретически такой режим вызывает дополнительную погрешность измерения, количественная оценка которой авторам неизвестна.

Для устранения данного рода недостатков предложен способ поверки, основанный на установке N массовых рас-

ходомеров на основе эффекта Кориолиса. Поверяющие расходомеры располагают как ниже, так и выше по течению относительно поверяемого расходомера, а система управления обеспечивает подачу потока вещества в измерительный и эталонные расходомеры. Поправочные коэффициенты получают путем обработки результатов измерений всех N массовых расходомеров.

На рис. 2 изображена принципиальная схема, на которой показано, каким образом используют устройства поверки расходомера во время его работы на трубопроводе.

Рассмотрим принцип сигналообразования на выходе измерительного устройства кориолисова расходомера. Протекающие в расходомере процессы носят нестационарный характер и априорная информация о характере изменения измеряемых сигналов отсутствует. Выходной сигнал с измерительных устройств расходомеров $Y(t)$, представляющих собой единичную реализацию нестационарного процесса, можно представить суммой информативной и неинформативных составляющих:

$$Y(t) = M(t) + M_{\text{ш}}(t) + M_r(t),$$

где $M(t)$ — информативная составляющая, описывающая значения массового расхода как функцию времени; $M_{\text{ш}}(t)$ — шумовая составляющая результатов измерений; $M_r(t)$ — грубо искаженные результаты измерений.

Повышение точности поверки означает синтез процедуры обработки результатов измерений $Y(t)$ с целью определения информативной составляющей $M(t)$ на фоне двух неинформативных — $M_{\text{ш}}(t)$ и $M_r(t)$.

Для минимизации влияния $M_{\text{ш}}(t)$ используем наилучший в данных условиях способ — усреднение по ансамблю реализаций $y_j(t_i)$, получаемых от N массовых расходомеров, где $j = \overline{2, N}$ — номер расходомера; i — номер реализации. При этом средняя квадратическая погрешность результатов измерений будет в $\sqrt{N}$ раз меньше по сравнению с применением одного массового расходомера. Данное предложение имеет скорее теоретический, чем практический характер, поскольку стоимость системы возрастает пропорционально числу эталонных кориолисовых расходомеров. Поэтому в [4] рассмотрены варианты для $N = 2$ или 4 и ожидаемый эффект составляет соответственно $\sqrt{2}$ и 2. Однако и этот результат может быть достигнут только при отсутствии корреляции анализируемых сигналов, т. е. при условии, что

N одновременно работающих массовых расходомеров не влияют друг на друга в пределах заданной точности. Для устранения этого влияния вводится операция предварительной совместной калибровки N расходомеров на специальном эталонном трубопроводе, обеспечивающем последовательное протекание вещества через все расходомеры. Для обеспечения этого режима впускные и выпускные отверстия устройства поверки соединены с ответвлениями трубопровода, рас-

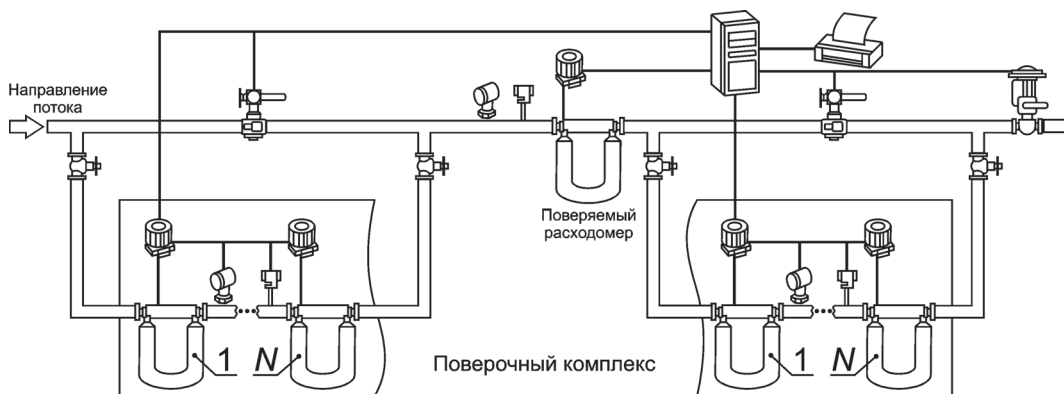


Рис. 2. Система поверки расходомера

положенными ниже по течению потока, чем рабочий расходомер, и с противоположных сторон запорных и сливных клапанов трубопровода.

В процессе калибровки регулируют фазовые соотношения между колебаниями используемых режимов работы расходомеров до достижения минимальной погрешности. Влияние расходомеров друг на друга ввиду близости их рабочих частот устраняется введением фазового сдвига между резонансными частотами, для того чтобы помехи, создаваемые расходомерами, были скомпенсированы.

В дополнение к множеству указанных режимов, обусловленных производным возбуждением расходомерных трубок, при поверке расходомера в трубопроводе в рабочих условиях возможны режимы, возникающие благодаря вибрации, внешней относительно расходомеров. Априорная информация о характеристиках внешних вибраций отсутствует. Чтобы уменьшить их влияние на результат поверки, применяемые расходомеры делят на две части, предпочтительно равные, и располагают симметрично относительно поверяемого расходомера. Таким образом, минимизируется смещение оценок калибровочного коэффициента измерения массового расхода.

Теперь остановимся на составляющей $M_r(t)$. Прежде чем осуществлять операцию усреднения по ансамблю, необходимо устранить грубо искаженные результаты измерений. Для этого на каждом интервале случайной длины для разностного процесса $\Delta_j(t)$ определяют максимальное значение $y_{\max}$ и устанавливают некоторый порог $\alpha y_{\max}$ в соответствии с заданным уровнем значимости α , где $0 < \alpha \leq 1$. Каждому значению разностного процесса $\Delta_j(t)$, превысившему пороговое значение, присваивается определенный вес, например 1. Данная процедура повторяется для всех L разностных процессов. При этом происходит накопление значений весов и строится их плотность распределения. Для заданного уровня значимости по плотности распределения весов определяют, какие результаты измерений необходимо исключить из дальнейшей обработки. Так устраняется воздействие импульсных помех, приводящих к появлению сильно искаженных результатов измерений.

Предложенный способ поверки расходомеров в рабочих условиях имеет некоторые недостатки. Проведенная поверка расходомера может дать справедливую оценку его точностных характеристик на длительный промежуток времени только при условии полной неизменности картины шумовых составляющих помех, действующих на расходомер со стороны окружающей среды. Данное допущение невозможно достичь при работе расходомера вне лаборатории.

При разработке поверочного комплекса на базе кориолисовых расходомеров следует учитывать, что рабочая частота расходомера является резонансной. Все шумовые составляющие помех с частотой, близкой к рабочей, будут увеличивать свою амплитуду, а следовательно, понижать точность работы системы. Исключить такие помехи практически невозможно.

Поверочные комплексы на базе кориолисовых расходомеров имеют существенный недостаток, связанный с получением информации о плотности потока. Устранение данного ограничения возможно лишь путем создания расходомеров Кориолиса, основанных на совершенно иных способах получения информации о расходе и не связанных с использованием резонансных частот, и расходомеров, имею-

щих помехо- и шумозащищенность со стороны трубопровода.

Существующие разработки кориолисовых расходомеров с использованием полимерных материалов позволяют сделать вывод о возможности применения в конструкции материалов с повышенными показателями коэффициента демпфирования и пониженными показателями коэффициента жесткости.

Конструкция подобного расходомера представляет собой металлическую трубу, соединенную с трубопроводом полимерными участками (рис. 3). Труба крепится к горизонтально расположенному основанию при помощи датчиков усилия. Основание является подвижной частью, совершающей колебания относительно вертикальной оси. Вследствие данных колебаний при протекании через трубу жидкости будет возникать сила Кориолиса, действующая в плоскости колебания трубы и направленная в одну сторону для обоих концов трубы. Возникновение силы Кориолиса и ее величина будут определяться датчиками усилия, что позволяет снимать значение напрямую, а не косвенно через деформацию трубы, как в классическом кориолисовом расходомере. Крепление расходомера к трубопроводу полимерными участками позволяет увеличивать амплитуду колебаний основания и тем самым силу Кориолиса и повышать точность ее измерения.

Определение плотности потока в данной конструкции основано на измерении сил инерции трубы с протекающим в ней веществом. Данный способ измерения не зависит от резонансной частоты. Поэтому предполагается подбирать рабочие частоты, не находящиеся в непосредственной близости от резонансной частоты расходомера.

Поверку расходомера целесообразно и проще проводить с использованием эталона массы. Поскольку конструкция расходомера основана на непосредственном измерении действующих на него сил и воздействие со стороны груза с заранее известной массой можно вычислить аналитически, в конструкции расходомера надо предусмотреть места для крепления системы поверочных грузов с эталонной массой. При работе расходомера без протекания потока вещества через трубу можно вычислить возникающую при этом силу инерции. Последующая установка на трубу эталонных источников массы изменит силу инерции. По разности сил инерции до и после размещения эталонных источников массы можно установить реакцию системы на них. Сверив показания с заранее рассчитанными аналитическими данными, можно точно вывести поправочный коэффициент для датчиков.

Таким образом, основываясь на предложенной конструкции кориолисова расходомера, можно реализовать поверку расходомера на месте эксплуатации с минимизацией влияния помех на показатели расхода поверяющего расходомера, построить график работы предприятия для последующего составления карты поправочных коэффициентов.

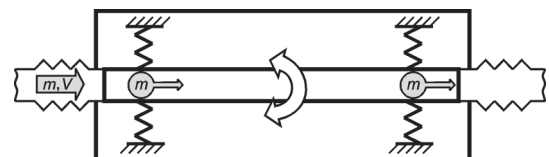


Рис. 3. Кориолисов расходомер инерционного типа

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств неразрушающего диагностирования бортовых радиотехнических устройств космических систем» (государственный контракт № 14.740.11.0840) ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009—2013)»

Л и т е р а т у р а

1. Пат. 2262670 РФ. Устройство и способ проверки расходомера / М. Антониевич // Изобретения. Полезные модели. 2005. № 29.

2. Пат. 2249183 РФ. Кориолисов расходомер и способ его изготовления/ Ван Клив Крейг Брэйнерд и др. // Изобретения. Полезные модели. 2005. № 9.

3. Гудков К. В. Анализ тенденций развития обобщенных структур кориолисовых расходомеров // Современные информационные технологии: Труды междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2009. Вып. 9. С. 62—65.

4. Пат. 2380660 РФ. Способ повышения точности проверки расходомера / М. Ю. Михеев и др. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 30.

Дата принятия 26.05.2011 г.

531.7.08

Совмещение частотных интегрирующих развертывающих преобразователей с датчиками давления

В. А. ВАСИЛЬЕВ, Н. В. ГРОМКОВ

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: opto@bk.ru

Рассмотрено совмещение частотных интегрирующих развертывающих преобразователей с датчиками давления. Показано, что при таком конструктивном решении можно уменьшить температурную составляющую погрешности, а также значительно снизить влияние неустойчивости источника питания.

Ключевые слова: датчик, давление, частотный интегрирующий развертывающий преобразователь, температура.

The combination of frequency integrating scanning converters with pressure sensors is considered. It is shown that at this design-circuit solution it is possible to reduce the temperature component of the error and to decrease significantly the influence of instability of power supply.

Key words: sensor, pressure, frequency integrating scanning converter, temperature.

Постоянное совершенствование средств измерений, развитие элементной базы и технологий предъявляют повышенные требования к разработчикам датчиковой аппаратуры по уменьшению габаритных размеров и потребляемой мощности, повышению надежности, чувствительности и стабильности при воздействии дестабилизирующих факторов, таких как температура, вибрации, неустойчивость источников питания и других, а также снижению стоимости измерительных преобразователей. С развитием микропроцессорной техники и компьютерных информационно-измерительных систем появилась возможность цифровой обработки сигналов датчиков различных физических величин, представленных в виде унифицированных сигналов (по току, напряжению, частоте), с коррекцией погрешностей нелинейности, неустойчивости источников питания и от влияния температуры окружающей и измеряемой сред.

Однако повышение точности датчиков за счет дополнительных средств обработки информации с выхода первич-

ных измерительных преобразователей приводит к снижению надежности, увеличению времени обработки информативного сигнала и повышению стоимости измерительных систем. К тому же, применение сравнительно сложных программируемых аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и микропроцессоров требует высокой квалификации настройщиков аппаратуры, поскольку приходится программировать данные устройства под каждый датчик отдельно с учетом разброса их параметров.

Повышение точности преобразования сигналов с датчиков давления простыми и недорогими методами и средствами остается весьма актуальной проблемой. Одним из перспективных направлений ее решения является разработка и исследование частотных интегрирующих развертывающих преобразователей (ЧИРП), совмещенных с датчиками давления. Такие преобразователи отличаются простотой схемной реализации при сравнительно высоких метрологических характеристиках, не требуют программирования, совме-