

УДК: 681.12

ВОЗМОЖНЫЕ ДИАПАЗОНЫ СТРУЙНОГО РАСХОДОМЕРА

А.И. Попов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: daten@ipu.ru

М.М. Беляев

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: mih295@yandex.ru

Ключевые слова: расходомер, объемный расход газа, поток реверса, диапазон измерения, погрешность измерения.

Аннотация: Представлены возможные диапазоны измерения расхода газа на примере расходомера с частотным выходом с датчиком расхода в виде струйного генератора. Расходомер содержит побудитель расхода для реверса части потока, блок управления, управляемый клапан и сопло. Измерение ведется по трем поддиапазнам. Расходомер с предложенной схемой управления имеет преимущество в сравнении с известными расходомерами газа в расширении диапазона измерения и снижении погрешности измерения в зоне малых расходов.

1. Введение

В современных расходомерах газа (таблица 1) динамические диапазоны измерения объемного расхода достигают величин 200-400 [1-4, отмеченные в строке «тип расходомера газа» и списке литературы], однако одновременно с этим во всем широком диапазоне возрастает погрешность измерения до 2,5% и более, особенно в нижней части диапазона. Для приборов [2] – до 5%, для приборов [3] - до 2,5%. Приведенные в таблице 1 устройства имеют различные по физическому принципу работы чувствительные элементы – датчики расхода. Расходомеры [1, 2] работают на принципе сбалансированной технологии измерения перепада давления при течении ламинарного потока, позволяющей вычислять значения расхода, линейно зависящие от перепада давления, в широком диапазоне. При этом чувствительные элементы установлены в байпасной линии потока и фактически используют для расширения диапазона свойства парциального измерения расхода. В устройстве [2] ламинарный элемент состоит из нескольких стальных дисков с прецизионно вытравленными маленькими каналами. Расходомеры [3, 4] работают на принципе съема тепловой энергии с патентованного резистора на основе тонкопленочной технологии, устойчивой к загрязнениям, которые расположены в основном потоке газа. Расходомеры [1-4] не имеют подвижных частей, а в [2-4] имеют нагревательные элементы. Струйный расходомер на базе струйного генератора [5] в отличие от других имеет частотный выход и также не имеет подвижных частей.

Таблица 1. Характеристики выпускаемых расходомеров

Тип расходомера газа	Цифровой расходомер потока газа серии M компании Alicat Scientific (Актан.ru)[1]	Расходомеры газа тепловые, моделей F-11AI– 70K IN-Flow компании Bronkhorst High-Tech B.V. (Нидер-ды)[2]	Встраиваемый расходомер воздуха и газов. VPFlowScope In-line . 2012 г. [3]	Расходомеры воздуха и газов. E+E Elektronik (Австрия) [4]	Расходомер счетчика газа Гранд-6 ТК, Россия, г. Ростов на Дону [5]
Модель Ду = 15 Диапазон л/ч	M-250SLPM-D 200 75-15000	1:50, цифровой до 1:187,5)	≈ 250 320-80000	EE771, разр 2010 г. 400 320-126000	150 40-6000
Порог, л/ч	75		от 320	от 320	от 40
Погрешность	±0.8% от показания + 0.2% от полной шкалы	± 0,8% от показ. ± 0,2% от полной шкалы;	± 2-5% от полной шкалы	±2.5% от показ. + 0.15% от полной шкалы.	±2,5 %
Перепад давления	≤6500 Па	-	-	-	≤1500 Па
Выходной сигнал	0-5 В постоянного тока / 4-20 мА, Цифр. RS232, 485	Аналоговый/ RS232	RS-485, настройка ПО, аналоговый 4..20 мА ,USB	0-10 В постоянного тока / 4-20 мА, Цифр. RS232, 485	Частота От 15 Гц
Датчик расхода	Ламинарный поток с линейной зависимостью расход газа-перепад давления	Датчик-капиллярная трубка, терморезистивные элементы в байпасе с разн. температурой T1, T2 пропорцион массовому расходу	Сенсор-Термоанемометр	Высокочувствительн. элемент на осн. Тонкопленочной технологии-высокоустойчивой к загрязнен.	струйный генератор+аналог-цифровой блок
Ориентир. стоимость			65000 руб		~5000 р.

2. Постановка задачи

Анализ характеристик известных выпускаемых расходомеров показал, что при увеличении динамического диапазона измерения увеличивается погрешность измерения, особенно в нижней части диапазона измерения. Поэтому на первом этапе была поставлена задача по расширению диапазона измерения расходомера при перепаде давления, не превышающим 200 Па. На втором этапе исследования задача ставилась по обеспечению приемлимой погрешности при измерении в наиболее неустойчивой начальной части диапазона.

3. Предмет разработки

Наиболее привлекательными расходомерами газа являются расходомеры на основе струйного генератора, не имеющие подвижных частей с выходным сигналом непосредственно в частотной форме. Поэтому проведенные исследования расходомера были выполнены с датчиком в виде струйного генератора. Но эти расходомеры имеют низкие технические показатели по диапазону измерения из-за его высокого порога чувствительности. Показанная на рис. 1 схема управления расходомером позволила получить в сравнении с известными образцами расходомеров газа [1-5] преимущества по ширине диапазона измерения и невысокой погрешности измерения (до 2%).

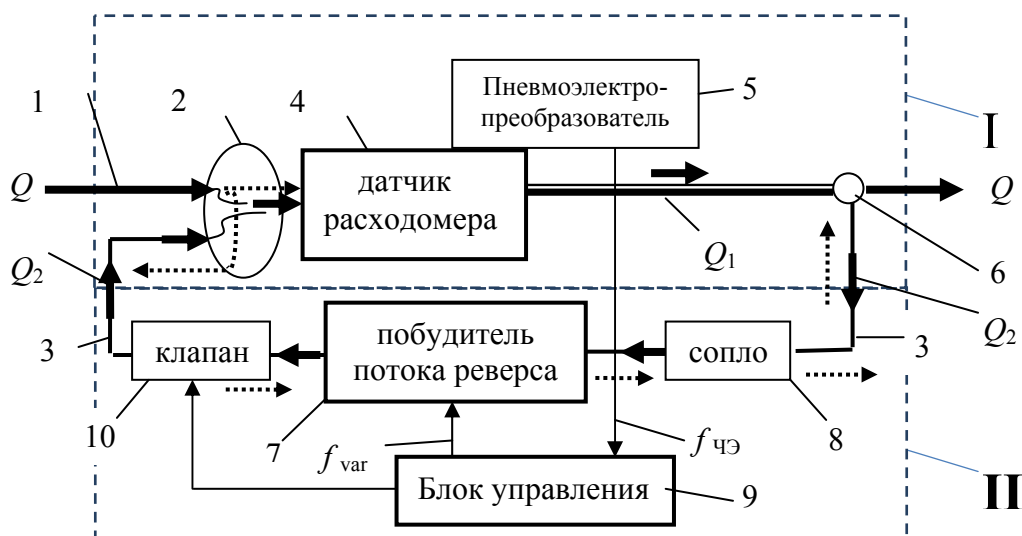
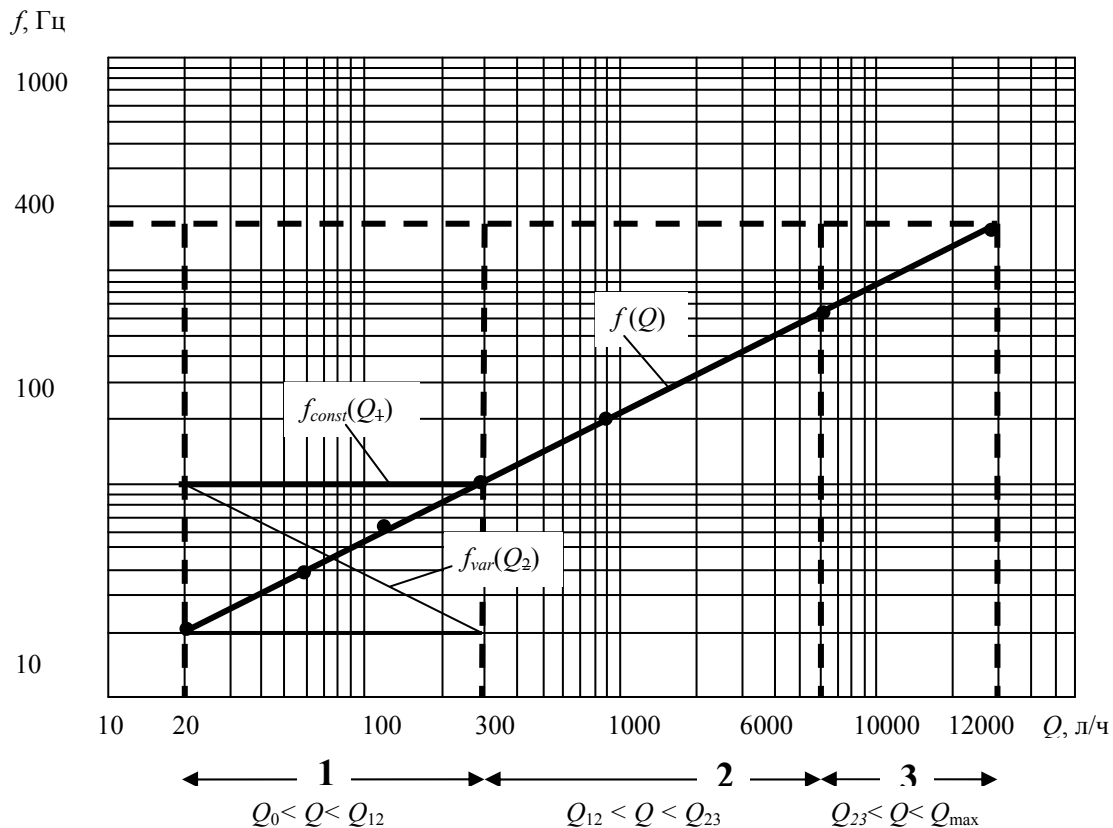


Рис. 1. Блок-схема расходомера газа, I – звено прямой цепи, II – звено отрицательной обратной связи в системе измерения.

На рис. 2 приведена в логарифмических координатах статическая характеристика предложенного широкодиапазонного струйного расходомера с тремя участками (поддиапазонами) измерения расхода, в которых перепад давления на датчике (струйном генераторе) не превышает ~ 200 Па. Перепад ограничивается конструктивным параметром выбранного, как пример, расходомера с $d_y = 15$.



Фиг. 2 Статическая характеристика расходомера на трех участках (поддиапазонах) измерения расхода в логарифмических координатах.

На первом поддиапазоне (начальный участок, процедура номер 1, $Q_0 < Q < Q_{12}$) к измеряемому потоку присоединяется и совместно с ним функционирует поток реверса, протекающий в дополнительном канале в направлении противоположно прямому направлению в основном канале (рис. 1). В процедуре номер 1 используется измерительная цепь, организованная по схеме встречно-параллельного соединения с отрицательной обратной связью (ООС). В этой процедуре включенный поток реверса по дополнительному каналу 3 помогает преодолеть порог чувствительности датчика 4 расходомера за счет суммы $Q_1 = Q + Q_2$ потока реверса Q_2 и измеренного потока Q по основному каналу 1. Измерение расхода Q проводится по схеме полной компенсации приращения ΔQ при уменьшении расхода ΔQ_2 в той же мере для поддержания расхода $Q_1 = \text{const}$ и его частоты $f_1 = \text{const}$. Использование системы управления с измерительной цепью ООС при реверсе потока позволяет проводить измерение расхода, начиная с более низкой величины порога чувствительности расходомера в пределах требуемой погрешности датчика. Суммарный расход Q_1 при этом измеряется с погрешностью звена цепи обратной связи с побудителем потока реверса. Контролируемый расход Q вычисляется блоком управления 9 по частоте питания побудителя потока реверса, поддерживающего постоянство суммарного расхода Q_1 . Как пример, на рис. 2 показано измерение начального расхода при 20 л/ч и пороге датчика 4 расходомера 300 л/ч. Коэффициент динамического диапазона первого участка составляет $K_1=15$. Влияние остальных поддиапазонов на общее расширение характеризуется своими коэффициентами K_2 и K_3 .

На втором поддиапазоне (второй участок, процедура номер 2, $Q_{12} < Q < Q_{23}$) измеряемый поток проходит через расходомер, в котором функционирует только датчик расхода 4 (струйный генератор) со всеми его погрешностями измерения и динамическим диапазоном $K_2 \leq 20$ для сохранения перепада давления на расходомере ≤ 200 Па.

Контролируемый расход вычисляется блоком управления 9 по выходной частоте датчика 4. Дополнительный канал 3 при этом закрыт клапаном 10.

На третьем поддиапазоне (третий участок, процедура номер 3, $Q_{23} < Q < Q_{\max}$) измеряемый поток проходит через расходомер, который функционирует в режиме парциального измерения при открытом клапане 10 в прямом направлении дополнительном канале 3. Погрешность в этом режиме определяется сохранением подобия течения по числу Рейнольдса по каналу самого датчика 4 расходомера и по дополнительному каналу, снабженного «парциальным» соплом 8. Перепад давления при измерении максимального расхода остается не более 200 Па.

Общий диапазон первого и второго участков в нашем примере расширен до 300 и с третьим участком до 600. Общее расширение динамического диапазона расходомера определяется произведением коэффициентов поддиапазонов измерения $K_1 K_2 K_3 = 15 \times 20 \times 2 = 600$. Известный западный образец расходомера [3] имеет начало измерения только от 30 л/ч в некоторой модификации с диапазоном 200.

Исследование обеспечения требуемой погрешности измерения на поддиапазонах является вторым этапом рассмотрения поставленной задачи.

На первом участке (**процедура номер 1, $Q_0 < Q < Q_{12}$**) уменьшение погрешности измерения расхода достигается структурным методом. Для обеспечения компенсационного метода измерения теоретически необходимо иметь звено I (прямая цепь) схемы измерения с чувствительностью $S_I \rightarrow \infty$ и $Q_2 \rightarrow 0$. Общая чувствительность системы измерения в пределе будет $S = S_I / (1 - S_I S_{II}) = 1 / S_{II}$, где S_{II} – чувствительность звена обратной связи II [6]. Коэффициенты влияния цепей в этом случае будут $\psi_I = 1 / (1 + S_I S_{II}) = 0$ и $\psi_{II} = -S_I S_{II} / (1 + S_I S_{II}) = -1$, где ψ_I и ψ_{II} соответственно коэффициенты влияния звена I прямой цепи и звена II обратной связи. Приведенная относительная погрешность расходомера по схеме (рис. 1) будет $\zeta = \psi_I \zeta_I + \psi_{II} \zeta_{II}$, где ζ_I и ζ_{II} – приведенные относительные погрешности звеньев прямой I и обратной II цепей.

На втором участке (**процедура номер 2, $Q_{12} < Q < Q_{23}$**) – погрешность измерения определяется датчиком расходомера, т.е. погрешностью струйного генератора, которая равна $\zeta = \pm 1,5 \%$.

Применяя **процедуру номер 3** измерения расхода ($Q_{23} < Q < Q_{\max}$), приведенной на рис. 1, в системе третий участок измерения, еще больше расширяет общий диапазон рпсходомера (рис. 2). На третьем участке с применением управляемого клапана и «парциального» сопла имеем расширенный диапазон измерения всего расходомера в данном примере 600, показанном на статической характеристике (рис. 2). Потенциально третий участок может иметь динамический диапазон K_3 с 2 до 20 при сохранении перепада 200 Па. При этом общий динамический диапазон расходомера может быть более 600 при общем перепаде 200 Па с увеличенным проходным сечением d_v . В процедуре номер 3 контролируемый расход вычисляется сразу по двум каналам (основному и дополнительному) блоком управления 9 по частоте датчика 4 (струйного генератора) расходомера. Направление потока по дополнительному каналу показано пунктирными стрелками (рис. 1).

В результате применения трех процедур измерения был значительно развит диапазон измерения струйного расходомера и не допущено снижение точности измерения при измерении малых расходов на участке первого поддиапазона, за счет применения структурного метода снижения погрешности измерения.

4. Заключение

В статье представлены возможности измерения струйным расходомером, состоящие в значительном расширении диапазона измерения тремя поддиапазонами (три участка), в которых перепад давления на расходомере газа не превышает ~ 200 Па. Снижение погрешностей измерения в нижнем диапазоне достигается применением структурной встречно-параллельной компенсационной схемы с отрицательной обратной связью.

Список литературы

1. Техническое описание цифрового расходомера потока газа серии М компании Актан /http://www.actan.ru/vac_gascontroll_gas-flow_3_1.html
2. Расходомеры газа тепловые моделей F-111 AI – 70K IN-Flow компании Bronkhorst High-Tech V.V.(Нидерланды)
3. Встраиваемый расходомер воздуха и газов. VPFlowScope In-line. 2012 г. / <http://datchiki.com/product/vpflowscope-inline/>
4. Расходомеры воздуха и газов. E+E Elektronik (Австрия). Модель EE771, разр. 2010 г. / www.merapribor.ru/
5. Расходомер Гранд 6ТК фирмы Турбулентность-Дон. Паспорт gfgb.00.00.000-10 пс. / www.turbo-don.ru, e-mail: info@turbo-don.ru
6. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств // М.: Машиностроение, 1976. С. 23-52.