

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЙ ТУРБИННЫЙ РАСХОДОМЕР

© 2011 г. С. К. Прищепов, К. И. Власкин

Уфимский государственный авиационный технический университет  
Россия, 450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12

Поступила в редакцию 13.12.2010 г.  
После доработки 24.03.2011 г.

Представлены результаты исследований взаимодействия магнитометрических градиентометров феррозондового типа с телом вращения расходомера в виде аксиальной турбины. Приведены новые свойства, конструктивные и схемные решения, возможности и области применения магнитометрических турбинных расходомеров.

Среди всего многообразия датчиков расхода в потоке (д.р.п.) наиболее универсальными являются турбинные расходомеры как обеспечивающие в трубопроводах измерение текущих объемов веществ вне зависимости от их природы: жидкости, газа, пара. Точность преобразования является основным достоинством турбинных расходомеров, так как у альтернативных д.р.п. погрешность измерения в потоке превышает 1.0%, что приводит к значительным энергетическим, экологическим, экономическим потерям. Погрешность не более 0.5% обеспечивается турбинными расходомерами лишь в случае прецизионного преобразования частоты вращения турбины в электрический сигнал [1].

Для формирования стабильной амплитудной характеристики электронных преобразователей турбинных расходомеров в их конструкции встраивается постоянный магнит, закрепленный на одной из движущихся частей тела вращения для воздействия на магнитометрическую систему датчика. Однако при этом невозможен контроль движущихся по трубопроводу магнитосодержащих, в частности, загрязненных сред: происходит осаждение магнитных частиц на поверхности устройства, что приводит к заклиниванию тела вращения [2].

Во многих конструкциях турбинка является элементом тахометрических преобразователей. Основным недостатком устройств данного типа является сложность измерения малых расходов — при низких частотах вращения турбины, когда тахометрические преобразователи становятся малоэффективными. Понижение точности происходит также вследствие тормозящего действия магнитного потока тахометра, замыкающегося через тело вращения [3, 4].

Таким образом, существует задача разработки магнитометрического турбинного расходомера со следующими функциональными возможностями:

1) использование в качестве тела вращения аксиальной турбины с регламентированным уровнем собственной намагниченности 5–100 нТл и малым собственным моментом инерции;

2) размещение датчика частоты вращения турбины в пазу стенки трубопровода без проникновения в канал протока с целью сокращения габаритов расходомера;

3) отсутствие тормозящего воздействия магнитометрического датчика на малоинерционную турбинку;

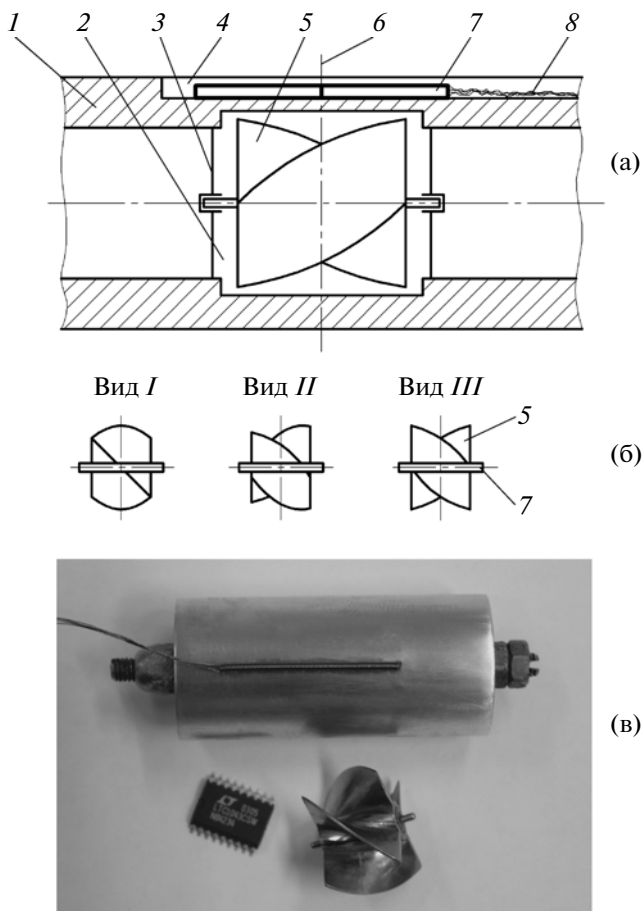
4) исключение из ряда измеряемых величин посторонних магнитных полей, в частности поля Земли, для устранения зависимости информационного сигнала от пространственного положения расходомера;

5) измерение частоты вращения турбины методом оценки ее углового положения, что обеспечивает идентичность статических и динамических амплитудных характеристик преобразователя, т.е. точность измерений вне зависимости от скорости протока;

6) возможность измерения высоких угловых скоростей — до  $10^5$  рад/с.

Данным требованиям отвечает расходомер с малогабаритным феррозондовым преобразователем (ф.п.) угловых перемещений 4-лопастной аксиальной турбины, схематически представленный на рис. 1а. На рис. 1б показаны характерные угловые положения лопастей аксиальной турбины относительно стержневого ф.п. На рис. 2 представлена функциональная схема расходомера, формы сигналов в характерных точках которой показаны на рис. 3.

В корпусе прибора 1 (рис. 1а) с калиброванным каналом протока жидкости 2, обтекателем 3



**Рис. 1.** Магнитометрический турбинный расходомер: **а** – конструктивная схема (1 – корпус; 2 – калиброванный канал протока жидкости; 3 – обтекатель с узлом подвеса турбинки; 4 – продольный паз; 5 – аксиальная турбинка; 6 – общая плоскость симметрии турбинки и градиентомера; 7 – феррозондовый преобразователь (градиентомер); 8 – кабель; б – характерные угловые положения лопастей турбинки относительно градиентомера; **в** – внешний вид лабораторного образца.

и пазом 4 продольно симметрично относительно плоскости 6 поперечного сечения канала трубопровода установлен феррозондовый градиентомер 7, расположенный над турбинкой 5. Градиентомер представляет собой прямой жесткий магниточувствительный сердечник, размещенный с минимальным зазором внутри однорядовых (соленоидных) обмоток феррозонда – сигнальной и возбуждения. Сигнальная обмотка (рис. 2) состоит из двух половин, одна из которых намотана встречно другой (режим градиентомера). Обмотки возбуждения 1 и сигнальная 4 соединены с электронным преобразователем, информация которого отображается на регистрирующем устройстве (частотомере).

В процессе измерения вектор магнитного поля малого градиента, каким является поле Земли,

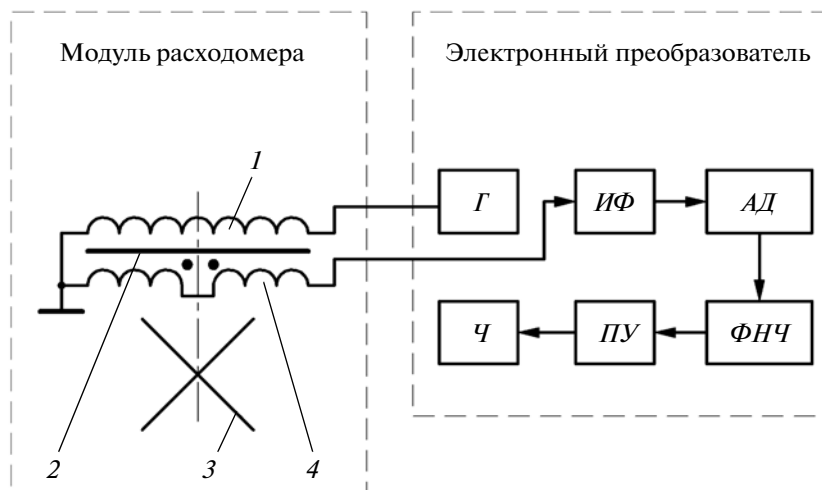
действует на магнитную систему градиентомера так, что устанавливается неизменный по длине сердечника уровень магнитной проницаемости, который определяется положением оси чувствительности ф.п. в пространстве. Неизменность по длине сердечника магнитной проницаемости обеспечивает равенство э.д.с. в сигнальных полуобмотках, каждая из которых также равномерно распределена по длине сердечника при одинаковом количестве витков полуобмоток. Направление намотки полуобмоток – противоположное по магнитному потоку в сердечнике, что определяет равенство нулю суммарной э.д.с. сигнальной обмотки при любом пространственном положении градиентомера в однородном поле.

Для нарушения такого состояния равновесия э.д.с. необходимо магнитное поле большого градиента, изменяющее проницаемость сердечника асимметрично относительно середины его магнитной оси. Крыльчатка расходомера сложной конфигурации с нормированным уровнем намагниченности 5–100 нТл является источником такого поля (рис. 1б).

(в) Поток жидкости в калиброванном канале 2 корпуса 1 вращает установленную в опорах обтекателя 3 малоинерционную турбинку 5 с угловой скоростью  $\omega$ , пропорциональной скорости потока. При этом на магнитную систему градиентомера воздействует поле турбинки большого градиента, обусловленного ярко выраженной неравномерностью распределения магнитного потенциала по поверхностям крыльчатки, определяемой ее геометрической формой.

Обмотка возбуждения 1 ф.п. (рис. 2) подключена к генератору повышенной (0.1–0.5 МГц) частоты  $f$ , вследствие чего поле возбуждения воздействует на магнитную систему сердечника 2 совместно с периодически  $T_\omega$  изменяющимся полем турбинки (рис. 3), причем частота вращения  $\omega$  значительно меньше частоты  $f$  возбуждения, поэтому поле турбинки является модулирующим. Сигнальная обмотка 4 ф.п. подключена к избирательному фильтру ИФ (рис. 2), который выделяет частоту  $2f$  информационного сигнала ф.п., модулированного полем вращающейся турбинки по амплитуде (рис. 3). В амплитудном детекторе АД происходит демодуляция сигнала, после чего несущая  $2f$  погашается фильтром низкой частоты ФНЧ, а сигнал с частотой  $1/T_\omega$  в преобразователе ПУ приводится к цифровому уровню для передачи на регистрирующее устройство (частотомер) Ч.

На рис. 1б (вид I) показано угловое положение крыльчатки (за полный оборот таких положений для 4-лопастной турбинки – четыре), когда линия лопасти по ее цилиндрической образующей расположена симметрично относительно середины оси чувствительности градиентомера, что соответствует минимуму его информационного сигнала.



**Рис. 2.** Функциональная схема магнитометрического расходомера. 1 – обмотка возбуждения ф.п.; 2 – сердечник ф.п.; 3 – турбинка; 4 – сигнальная обмотка ф.п.; Г – генератор возбуждения; ИФ – избирательный фильтр частоты  $2f$ ; АД – амплитудный детектор; ФНЧ – фильтр низкой частоты; ПУ – преобразователь уровня; Ч – регистрирующее устройство (частотомер).

ла. Любые другие угловые положения турбинки (виды II, III) характеризуются разностью магнитного воздействия лопастей по длине сердечника, что нарушает равновесие э.д.с. сигнальных полуобмоток и приводит к повышению уровня информационного сигнала градиентомера.

При вращении турбинки информационный сигнал преобразователя изменяется по периодическому закону с четырьмя минимумами за период (рис. 3), причем длительность периода  $T_0$  определяется частотой вращения турбинки и, следовательно, скоростью потока жидкости.

Поскольку составляющие поля Земли и уровень магнитной индукции турбинки могут иметь один порядок, разделение помехи и измеряемой величины чувствительным элементом возможно лишь при взаимной ориентации конструктивных элементов расходомера (ось вращения крыльчатки – паз корпуса – обмотки ф.п. – сердечник) с высокой степенью точности, так как эта точность лежит в основе принципиальной работоспособности устройства: вращающаяся крыльчатка, расположенная в общих плоскостях симметрии с осью чувствительности градиентомера, не нарушает его статической балансировки – компенсации сигнала сигнальной обмотки по магнитному воздействию поля Земли.

Существенный эффект – минимум сигнала при максимальном сближении лопасти турбинки с точкой наибольшей чувствительности градиентомера (вид I на рис. 1б) – обусловлен специально организованной взаимной пространственной ориентацией магнитных силовых линий крыльчатки сложной формы и плоскостей симметрии градиентомера.

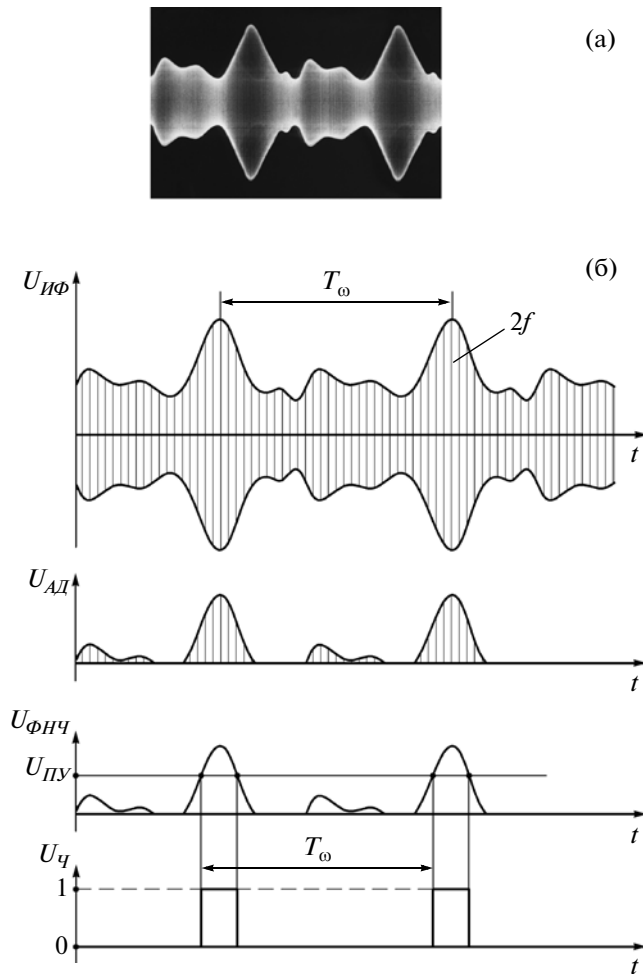
С применением феррозондового преобразователя пополнился ряд функциональных возможностей турбинных расходомеров:

- практически устранена тормозящая сила потягивания малоинерционной турбинки с магниточувствительным преобразователем ее углового положения;
- расширен диапазон измеряемых скоростей потока;
- повышена прочность корпуса расходомера благодаря малым габаритам датчика.

Кроме того, обеспечена оперативность замены расходомеров, так как их корпуса представляют собой модули, конструктивно совместимые с трубопроводами (рис. 1). Эта функциональная возможность повышает надежность эксплуатации в сложных условиях, как, например, в скважинной аппаратуре, компоновка которой производится многократно – на каждый рейс к забою [2, 5].

При использовании расходомера (рис. 1–3) в приборах и системах разнообразных областей техники были реализованы следующие достоинства магнитометрических д.р.п.:

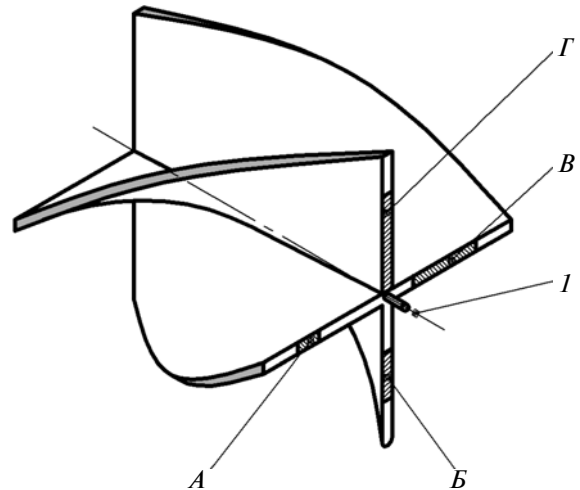
- 1) оптимизация контроля динамических потоков путем уменьшения момента инерции тела вращения;
- 2) повышение достоверности контроля магнитозагрязненных сред за счет получения отношения сигнал/шум магнитометрической системы не хуже 10–20 дБ;
- 3) возможность измерения расходов реверсивных потоков;
- 4) возможность определения угловых положений турбинки с разрешением 0,25 оборота, что повышает точность измерения малых расходов.



**Рис. 3.** Формы сигналов электронного преобразователя: **а** – осциллограмма сигнала на выходе избирательного фильтра **ИФ**; **б** – сигналы:  $U_{ИФ}$  – на выходе избирательного фильтра;  $U_{АД}$  – на выходе амплитудного детектора;  $U_{ФНЧ}$  – на выходе фильтра низкой частоты;  $U_{ПУ}$  – опорный преобразователя уровня;  $U_{Ч}$  – на входе частотомера;  $2f$  – несущая частота избирательного фильтра;  $T_{\omega}$  – период вращения турбинки.

Это последнее свойство получено при изготовлении турбинки из композитных материалов (рис. 4), обеспечивающих минимум ее момента инерции и нулевой уровень намагниченности [6].

На торцевых поверхностях лопастей размещены метки с четырьмя малыми различными ( $A, B, B, \Gamma$ ) уровнями магнитной индукции. В остальной конструкции расходомера подобна приведенной на рис. 1. Осциллограммы, отображающие характер взаимодействия магнитных меток турбинки и градиентомера, приведены на рис. 5. Поскольку магнитные метки нанесены только на одну торцевую поверхность турбинки, уровень информационного сигнала ф.п. зависит только от ее углового положения относительно одного из полуэлементов дифференциального магнитометрического преобразователя.

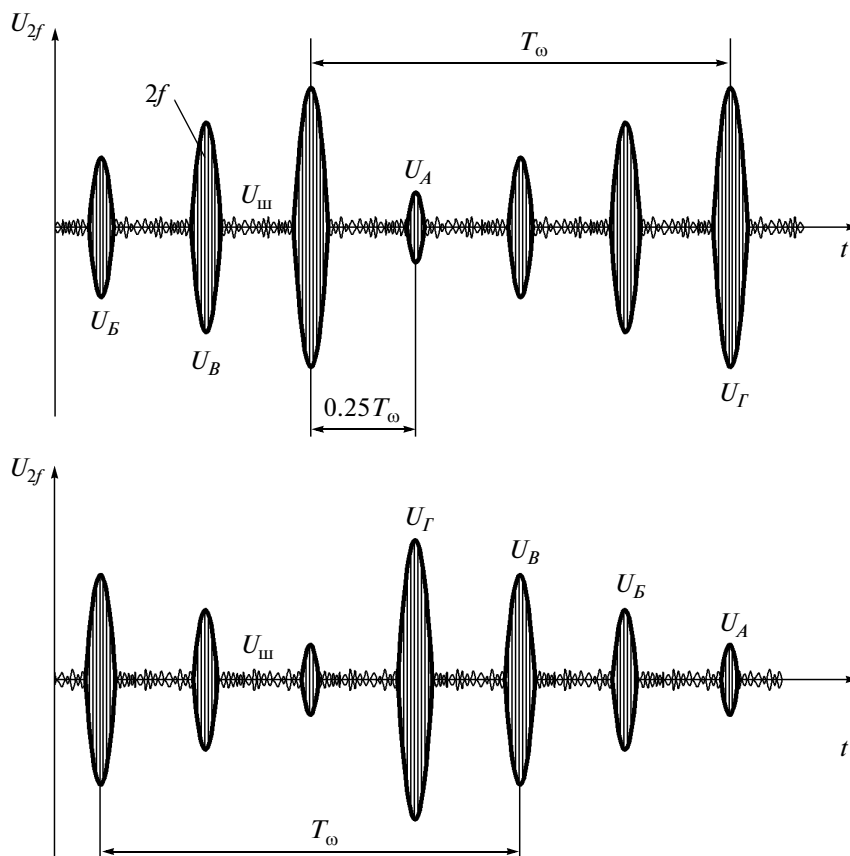


**Рис. 4.** Общий вид аксиальной турбинки.  $I$  – полуось турбинки;  $A, B, B, \Gamma$  – магнитные метки.

Так, согласно рис. 1б (вид  $I$ ) любая из магнитных меток (рис. 4) равноудалена от оси градиентомера, чему соответствует минимум его информационного сигнала – уровень шума  $U_{ш}$  (рис. 5). Максимумы информационного сигнала  $U_{2f}$  формируются при соответствии углового положения турбинки виду  $II$  (рис. 1б), когда магнитные метки максимально приближены к полуэлементу дифференциального магнитометрического преобразователя.

Уровни намагниченности меток рассчитаны таким образом, чтобы различия соседних по осциллограмме рис. 5 уровней  $U_A, U_B, U_B, U_{\Gamma}$  информационного сигнала градиентомера составляли 25%. Данные различия уровней обеспечивают наибольшую помехоустойчивость расходомера при определении электронной схемой информационных сигналов  $U_A, U_B, U_B, U_{\Gamma}$ , а также идентификацию наименьшего из них  $U_A$  на уровне шума  $U_{ш}$ .

Представленные на рис. 5 особенности преобразования информационного сигнала градиентомера позволяют считывать угловые положения турбинки с разрешением до четверти оборота, что повышает точность контроля быстро изменяющихся потоков, а также малых расходов жидкостей и газов. Существует возможность измерения расхода реверсивных потоков: достаточно определять характер последовательности изменения уровней информационного сигнала как нарастание (рис. 5а) или убывание (рис. 5б). Данная функциональная возможность необходима, например, при использовании расходомера в системах контроля динамических параметров дыхательной системы человека, в частности для определения моментов начала вдоха, выдоха.



**Рис. 5.** Временные диаграммы: **а** – нарастающие за период  $T_{\omega}$  уровни  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_B$ ,  $U_{Г}$  сигнала преобразователя по магнитным меткам рис. 4 соответственно  $A$ ,  $B$ ,  $B$ ,  $Г$  (вращение по часовой стрелке); **б** – отображение преобразователем вращения турбинки против часовой стрелки;  $U_{ш}$  – уровень шума на выходе избирательного фильтра при угловом положении турбинки согласно рис. 1б (вид  $L$ );  $2f$  – несущая частота избирательного фильтра.

В гидро- и газодинамических системах реверс потока необходимо выявлять как несанкционированный, либо аварийный режим их работы [7, 8].

Представленный магнитометрический турбинный расходомер нашел применение в скважинных системах измерения и контроля, в медицинской технике, при исследовании гидро- и газодинамических процессов в магистральных трубопроводах.

## ВЫВОДЫ

1. В многофункциональном турбинном расходомере метод магнитометрии наиболее эффективно обеспечивает невозмущающий дистанционный контроль угловых положений и частоты вращения аксиальной турбинки, что дополняет ряд конструктивных, метрологических и технологических преимуществ данного д.р.п.

2. Высокие метрологические и эксплуатационные характеристики турбинных расходомеров обеспечиваются применением магнитометрических градиентомеров феррозондового типа, отвечающих наиболее полной совокупности технических требований к расходомерам, прежде всего по опти-

мальному соотношению чувствительность/помехоустойчивость, что необходимо для достоверности контроля сред, движущихся в трубопроводах, вне зависимости от их природы: жидкости, газа, пара.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. М.: Изд-во стандартов, 1990.
2. Филин Н.И., Киселев А.В., Александров С.С. и др. А.с. 883367 // БИ. 1981. № 43. С. 153.
3. Бар-Слива В.И., Буткин В.М., Бухонов А.Д., Камышев Л.А. А.с. 1114884 // БИ. 1984. № 35. С. 100.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. СПб: Политехника, 2002.
5. Ковшов Г.Н., Филин Н.И., Прищепов С.К., Александров С.С. А.с. 1578479 // БИ. 1990. № 26. С. 165.
6. Прищепов С.К., Будилов К.В., Ефремов К.Н. Патент 2182660 РФ // БИ. 2002. № 14. С. 259.
7. Корольков В.С. А.с. 1307342 // БИ. 1987. № 16. С. 180.
8. Техническая кибернетика. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления / Под общ. ред. В.В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1973.