

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **040224**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.05.06

(51) Int. Cl. **G01F 1/66** (2006.01)

(21) Номер заявки
202191679

(22) Дата подачи заявки
2021.06.10

(54) **УСТРОЙСТВО И СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗЫ СИГНАЛА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА РАСХОДОМЕРА**

(43) **2022.04.29**

(56) US-A1-20190277680
US-A1-20050140522
RU-C2-2178148
US-B2-9689726
US-A1-20080307895

(96) **2021/EA/0032 (BY) 2021.06.10**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ЮНИК
ЛАБ" (BY)**

(72) Изобретатель:
**Иваницкий Алексей Иванович,
Мачульский Павел Владимирович,
Коротыш Александр Семёнович (BY)**

(74) Представитель:
Беляева Е.Н. (BY)

(57) Изобретение относится к измерению параметров потоков движущейся среды, в том числе измерению расхода газа, жидкости, тепла посредством фазовых расходомеров. Предложено устройство определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера, включающее связанные между собой соответствующими входами и выходами аналогово-цифровой преобразователь (1) поступающего на его вход ультразвукового сигнала, модуль (2) выделения квадратурных составляющих сигнала, содержащий умножители (3, 4), цифровой гетеродин (5) и низкочастотные фильтры (6, 7), модуль (8) расчёта фазы сигнала и связанный с его выходом модуль (9) вероятностной оценки фазы сигнала, содержащий последовательно связанные между собой буфер (10) обработки множества мгновенных значений фазы сигнала, выполненный с возможностью работы по принципу FIFO, блок (11) формирования вариационного ряда A2 из множества мгновенных значений фазы сигнала, блок (12) определения математического ожидания и фильтр (13) нижних частот, при этом модуль (9) вероятностной оценки фазы сигнала выполнен с возможностью получения на его выходе значения F2 фазы сигнала. Предложен также соответствующий способ определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера. Заявляемое устройство и способ определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера обеспечивают повышение точности определения (расчёта) мгновенной фазы и, тем самым, расчёта расхода текущей среды, а также исключают влияние возможных сигналов-помех (шумов) на результаты расчётов.

040224
B1

040224
B1

Изобретение относится к измерению параметров потоков движущейся среды, в том числе измерению расхода газа, жидкости, тепла, путём пропуска непрерывного потока через измерительное устройство (счётчик/расходомер), содержащее измерительную трубку, в полости которой установлены ультразвуковые приёмопередающие датчики, и средства обработки сигналов ультразвуковых датчиков с определением фазы сигналов. Изобретение может быть использовано, в частности, в различных измерительных устройствах (приборах учёта расхода - счётчиках/расходомерах, устанавливаемых на различных объектах в системах водоснабжения коммунального хозяйства и у индивидуальных потребителей в быту) для измерения фазовым способом расхода текучей среды, в том числе газа, воды, тепла.

Основу способов расчёта расхода текучей среды в ультразвуковых расходомерах составляет точное измерение времени задержки сигнала при его распространении в движущейся текучей среде. При этом одним из основных способов измерения времени задержки сигнала, который нашёл применение в промышленных образцах ультразвуковых расходомеров (в частности, счётчиках газа) является измерение, основанное на анализе мгновенной фазы сигнала - фазовый способ измерения.

Ультразвуковой расходомер традиционно содержит ультразвуковой преобразователь, который представляет собой отрезок измерительной трубки, в полости которой установлены ультразвуковые приёмопередающие датчики (пьезоэлементы), и измерительное устройство, включающее различные блоки для обработки сигналов ультразвуковых датчиков (в частности, для определения фазы ультразвукового сигнала) с получением на выходе значения расхода среды [1]. Ультразвуковые сигналы в измерительной трубке распространяются в двух направлениях - в прямом и обратном относительно вектора скорости движения среды.

Измерительное устройство регистрирует фазы ультразвуковых сигналов на выходах датчиков и по их разности определяет скорость движения среды.

Известен ультразвуковой расходомер - счётчик газа, который содержит мерный участок трубопровода с датчиком давления и двумя ультразвуковыми преобразователями, а также средства обработки ультразвуковых сигналов преобразователя, в том числе аналоговый коммутатор, опорный генератор, таймер, формирователь зондирующих импульсов, арифметическое устройство, приёмный усилитель, компаратор, триггер, счётчик импульсов, схему сложения и схему вычитания, N параллельно включённых блоков памяти, подключённых ко второму коммутатору, блок определения типа газовой среды, блок кода стандартной плотности, делитель кодов, генератор импульсов, логическую схему определения мгновенной фазы колебаний опорного генератора в момент прекращения счёта, M накопительных конденсаторов, соединённых с выходами преобразователя уровней питания, и M параллельно включённых коммутаторов, вход каждого из которых подключён к накопительному конденсатору, а выход - к цепи питания каждого блока через соответствующий сглаживающий фильтр [2]. Среди недостатков такого счётчика следует отметить способ определения скорости потока - измерение времени задержки ультразвуковых сигналов, распространяющихся в прямом и обратном направлении относительно вектора скорости движения среды. Указанное время измеряется в момент превышения уровня ультразвукового сигнала некоторого порога. Реализация способа требует применения специально подобранных по характеристикам ультразвуковых датчиков, а также высокоточных прецизионных таймеров. В модели не учитывается изменение огибающей ультразвукового сигнала в процессе эксплуатации расходомера, связанное с устареванием ультразвуковых датчиков и возможными их загрязнениями, что приведёт к ошибкам измерений.

Известен ультразвуковой счётчик газа, включающий корпус с входными и выходными патрубками, измерительное устройство с ультразвуковыми приёмопередающими датчиками, блок управления и вычисления на базе микроконтроллера Texas Instruments, жидкокристаллический индикатор, источник электропитания [3]. В указанном счётчике для определения скорости движения среды применяется метод, основанный на получении взаимной корреляционной функции ультразвуковых сигналов, распространяющихся в прямом и обратном направлении относительно вектора скорости движения среды, аппроксимации её огибающей для точного определения номера отсчёта с максимальным значением, который пересчитывается во время задержки. Очевидным недостатком такого подхода к определению скорости движения среды является необходимость применения специально подобранных по характеристикам ультразвуковых датчиков, а также невозможность компенсации амплитудных и фазовых искажений ультразвуковых сигналов, вызванных турбулентными потоками, что приведёт к ошибкам измерения.

Из уровня техники известны различные ультразвуковые расходомеры, в которых определение расхода текучей среды основано на фазовом способе расчёта, и для обработки ультразвуковых сигналов использованы соответствующие устройства (блоки, модули) с определённым элементным составом и схемами коммутации [4, 5]. Недостатками устройств для обработки ультразвуковых сигналов в составе фазовых ультразвуковых расходомеров является отсутствие решений по повышению точности определения мгновенного значения фазы и исключению из расчёта фазы возможных сигналов-помех.

По совокупности общих технических признаков в качестве прототипа для заявляемого устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера может быть принято устройство определения фазы из состава упомянутого выше ультразвукового счётчика газа [2].

Задачей изобретения является создание устройства определения фазы сигнала ультразвукового дат-

чика расходомера, а также соответствующего способа определения фазы. Заявляемое устройство и способ определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера должны обеспечивать повышение точности определения (расчёта) мгновенной фазы и, тем самым, расчёта расхода текущей среды, а также исключать влияние возможных сигналов-помех на результаты расчётов (обеспечивать устойчивость к различным видам помех). При этом требования к идентичности характеристик приёмопередающих ультразвуковых датчиков не должны предъявляться, что позволит снизить стоимость заявляемого устройства, а также расходомера в целом.

Поставленная задача решается, и указанные технические результаты достигаются заявляемым устройством определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера, включающим связанные между собой соответствующими входами и выходами аналогово-цифровой преобразователь поступающего на его вход ультразвукового сигнала, модуль выделения квадратурных составляющих сигнала, содержащий умножители, цифровой гетеродин и низкочастотные фильтры, и модуль расчёта фазы сигнала, выполненный с возможностью получения на его выходе мгновенного значения фазы сигнала. Поставленная задача решается, и указанные технические результаты достигаются за счёт того, что заявляемое устройство дополнительно содержит модуль вероятностной оценки фазы сигнала, связанный с выходом модуля расчёта фазы сигнала и содержащий последовательно связанные между собой буфер обработки множества мгновенных значений фазы сигнала, выполненный с возможностью работы по принципу FIFO, блок формирования вариационного ряда из множества мгновенных значений фазы сигнала, блок определения математического ожидания, и фильтр нижних частот, при этом модуль вероятностной оценки фазы сигнала выполнен с возможностью получения на его выходе значения фазы сигнала.

Наличие в заявляемом устройстве определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера дополнительно модуля вероятностной оценки фазы сигнала позволяет получить более точное значение фазы сигнала на основе множества полученных за определённый временной интервал мгновенных значений фазы сигнала и последующей обработки этого множества значений, а также с учётом исключения влияния сигналов-помех (шумов).

Упомянутый выше в связи с буфером обработки множества мгновенных значений фазы сигнала "принцип FIFO" его работы хорошо известен специалистам в данной области техники и описывает принцип технической обработки очереди или обработки поступающей информации путём упорядочения процесса по принципу: "первым пришёл - первым обслужен".

Заявляемое устройство определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера имеют универсальную и достаточно простую конструкцию, практически не требующую сложных коммутационных связей между элементами и блоками, и применимы в ультразвуковых расходомерах (счётчиках расхода) газа, воды и тепла, в которых движение среды может носить как ламинарный, так и турбулентный характер. Для исключения флуктуаций значений вероятностной оценки фазы $\hat{\varphi}$ в состав модуля вероятностной оценки фазы сигнала включён дополнительный фильтр нижних частот. Импульсная характеристика указанного фильтра определяется, исходя из конкретных условий работы модуля вероятностной оценки фазы сигнала, заявляемого устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера и расходомера в целом.

В общем случае, элементная база, на которой может быть реализован как модуль вероятностной оценки фазы сигнала, так и заявляемое устройство в целом достаточно широка и известна и доступна специалистам в данной области техники.

Поставленная задача решается, и указанные технические результаты достигаются также заявляемым способом определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера в охарактеризованном выше устройстве определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера, включающим получение сигнала ультразвукового датчика расходомера, его аналогово-цифровое преобразование, выделение квадратурных составляющих сигнала и расчёт фазы сигнала с получением мгновенного значения фазы сигнала. Поставленная задача решается, и указанные технические результаты достигаются за счёт того, что дополнительно оценивают фазу ультразвукового сигнала на основе вероятностной модели, для чего накапливают результаты K расчётов мгновенного значения фазы φ_i , где $i = 0, K - 1$, сигнала в течение заданного интервала времени, формируют из них вариационный ряд в виде ранжированной по возрастанию матрицы-строки

$$\Phi^v = \{\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{K-1}\},$$

где $\varphi_0 < \varphi_1 < \varphi_2, \dots < \varphi_{K-1}$,

перемножают вариационный ряд с матрицей

$$P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_{K-1}\}$$

весовых коэффициентов p_i , где $i = 0, K - 1$, соответствующих дискретным значениям плотности вероятности распределения шума, определяют математическое ожидание, соответствующее оценке фазы сигнала, путём суммирования результатов перемножения

$$\hat{\varphi} = \sum_{i=0}^{K-1} (\Phi_i^y P_i)$$

и сглаживают во времени результаты оценки фазы сигнала.

Описанная последовательность обработки сигнала позволяет получить максимально точное значение фазы на основе K измерений (расчётов мгновенного значения фазы φ_i) и исключить при этом влияние сигналов-помех (шумов).

В предпочтительных формах реализации заявляемого способа определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера значения плотности вероятности распределения шума определяют экспериментально в зависимости от факторов, выбранных из группы, включающей, по меньшей мере, тип ультразвукового датчика, схемотехническое решение устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера и расходомера в целом, параметры элементной базы устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера и расходомера в целом.

Также предпочтительными являются формы реализации, в которых количество результатов K измерений мгновенного значения фазы сигнала определяют по правилу Стёрджеса. Правило Стёрджеса известно специалистам в данной области техники как эмпирическое правило определения оптимального количества интервалов, на которые разбивается наблюдаемый диапазон изменения случайной величины при построении гистограммы плотности её распределения.

Упомянутые выше и другие достоинства и преимущества заявляемого изобретения далее будут рассмотрены более подробно на предпочтительном, но не ограничивающем объём притязаний примере реализации заявляемого устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера со ссылками на позиции фигур чертежей, на которых схематично представлены

фиг. 1 - функциональная блок-схема заявляемого устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера;

фиг. 2 - функциональная блок-схема модуля вероятностной оценки фазы сигнала.

На фиг. 1 изображена функциональная блок-схема заявляемого устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера в составе аналого-цифрового преобразователя 1, модуля 2 выделения квадратурных составляющих сигнала, включающего умножители 3, 4, цифровой гетеродин 5 и низкочастотные фильтры 6, 7, модуля 8 расчёта фазы сигнала и модуля 9 вероятностной оценки фазы сигнала.

На фиг. 2 изображена функциональная блок-схема модуля 9 вероятностной оценки фазы сигнала, который содержит последовательно связанные между собой буфер 10 обработки множества мгновенных значений фазы φ_i сигнала, выполненный с возможностью работы по принципу FIFO, блок 11 формирования вариационного ряда из множества мгновенных значений фазы сигнала по результатам многократных K опытов по расчёту мгновенных значений фаз, блок 12 определения математического ожидания на основе априорной определённости закона распределения шума, и фильтр 13 нижних частот. На его выходе модуля 9 вероятностной оценки фазы сигнала получается значение фазы сигнала.

На фиг. 1 и 2 для указания различных сигналов и их составляющих использованы следующие буквенно-цифровые обозначения: S1 - исходный сигнал в цифровом виде (на выходе АЦП 1), S2 - синфазная составляющая сигнала гетеродина 5, S3 - квадратурная составляющая сигнала гетеродина 5, S4 - результат умножения исходного сигнала и синфазной составляющей сигнала гетеродина 5, S5 - результат умножения исходного сигнала и квадратурной составляющей сигнала гетеродина 5, S6 - синфазная составляющая сигнала на выходе модуля 2 выделения квадратурных составляющих сигнала, S7 - квадратурная составляющая сигнала на выходе модуля 2 выделения квадратурных составляющих сигнала, F1 - мгновенное значение фазы сигнала, F2 - вероятностное значение фазы сигнала (математическое ожидание), F3 - значение фазы сигнала, A1 - одномерная матрица-строка мгновенных значений фазы сигнала, A2 - вариационный ряд мгновенных значений фазы сигнала.

Заявляемое устройство определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера работает и способ определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера следующим образом.

Известно, что для определения разности фаз, по которой можно рассчитать расход, необходимо выделить синфазную и квадратурную составляющую каждого сигнала, рассчитать мгновенные значения фаз и определить их разность.

Для этого действительный сигнал в аналоговой форме

$$u(t) = U_a(t) \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0),$$

с частотой f_0 и начальной фазой φ_0 , принимаемый ультразвуковым приёмопередающим датчиком (на чертежах не изображён), поступает на вход аналого-цифрового преобразователя 1, осуществляющего формирование дискретных отсчётов с частотой F_d . В цифровом виде указанный сигнал

$$u_d = u \left(\frac{n}{F_d} \right), n = \overline{0, N-1},$$

где N - количество отсчётов сигнала,

с выхода аналого-цифрового преобразователя 1 умножается в умножителях 3 и 4, соответственно,

на синфазную S2

$$U_{I_d} = \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$$

и квадратурную S3

$$U_{Q_d} = -\sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$$

составляющие сигнала цифрового гетеродина 5. Результат умножения сигналов S4 и S5, соответственно, фильтруется в фильтрах 6 и 7 нижних частот. Импульсные характеристики указанных фильтров определяются исходя из конкретных условий применения устройства, параметров сигналов и аналого-цифрового преобразователя. В самом простом случае может использоваться операция усреднения.

С выходов указанных фильтров синфазная S7

$$Re_u = \frac{1}{N} \sum_{d=0}^{N-1} u_d U_{I_d}$$

и квадратурная S8

$$Im_u = \frac{1}{N} \sum_{d=0}^{N-1} u_d U_{Q_d}$$

составляющие передаются в модуль 8 расчёта фазы сигнала для расчёта мгновенного значения F1 фазы

$$\varphi = \operatorname{atan}\left(\frac{Im_u}{Re_u}\right).$$

На основе рассчитанных мгновенных значений фаз φ на выбранном интервале наблюдения, определяемом периодом и количеством опытов по измерению фазы сигнала, с учётом закона распределения шума при проведении измерений, в модуле 9 вероятностной оценки фазы сигнала осуществляется оценка фазы сигнала.

Модуль 9 вероятностной оценки фазы работает по следующему принципу. Результаты K опытов по расчёту мгновенных значений фаз накапливаются в буфере 10 обработки множества мгновенных значений фазы сигнала и передаются в виде одномерной матрицы-строки A1

$$\Phi = \{\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{K-1}\}$$

в блок 11 формирования вариационного ряда из множества мгновенных значений фазы сигнала - ранжирования элементов матрицы-строки A1 по возрастанию

$$\Phi^v = \operatorname{var}(\Phi) = \{\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{K-1}\}, \varphi_0 < \varphi_1 < \varphi_2 \dots < \varphi_{K-1}.$$

С выхода блока 11 формирования вариационного ряда из множества мгновенных значений фазы сигнала вариационный ряд A2 Φ^v передаётся в блок 12 определения математического ожидания. В памяти блока 12 определения математического ожидания содержится одномерная матрица-строка

$$P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_{K-1}\},$$

коэффициенты $p_i, i = \overline{0, K-1}$ которой являются дискретными значениями плотности вероятности закона распределения шума. Следует отметить, что плотность вероятности закона распределения шума зависит от многих факторов, таких как типы применяемых приёмопередающих ультразвуковых датчиков, схемотехнические решения устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера и расходомера в целом, параметры элементной базы устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера и расходомера в целом и других. В связи с чем, указанную плотность вероятности целесообразно находить экспериментально. Тогда минимальное и достаточное количество опытов K для оценки фазы ультразвукового сигнала в модуле 9 вероятностной оценки фазы сигнала, можно определить согласно правила Стёрджеса.

Искомая оценка фазы ультразвукового колебания определяется как математическое ожидание

$$\hat{\varphi} = \sum_{i=0}^{K-1} (\Phi_i^v P_i)$$

С учётом того, что предлагаемое устройство определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера применимо в ультразвуковых счётчиках расхода любой текучей среды - газа, воды и тепла, в которой движение среды может носить как ламинарный, так и турбулентный характер, для исключения флуктуации значений $\hat{\varphi}$ в состав блока включён дополнительный фильтр 13 нижних частот, в котором полученное оценочное значение фазы сглаживаются во времени. Импульсная характеристика указанного фильтра определяется исходя из конкретных условий работы заявляемого устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера и расходомера в целом.

Источники информации.

1. Ультразвуковой метод измерения расхода. Сайт компании ENOTEK. [Электронный ресурс] - 23 апреля 2021. - Режим доступа: <https://eno-tek.ru/blog/teplo-blog/ultrasonic-method>.
2. Патент RU № 2178148 С2, опубл. 01.10.2002.
3. Патент US № 9689726 В2, опубл. 27.06.2017.
4. Патент EP № 0262461 В1, опубл. 15.12.1993.
5. Патент US № 7637171 В2, опубл. 29.12.2009.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера, включающее связанные между собой соответствующими входами и выходами аналогово-цифровой преобразователь (1) поступающего на его вход ультразвукового сигнала, модуль (2) выделения квадратурных составляющих сигнала, содержащий умножители (3, 4), цифровой гетеродин (5) и низкочастотные фильтры (6, 7), и модуль (8) расчёта фазы сигнала, выполненный с возможностью получения на его выходе мгновенного значения F1 фазы сигнала, отличающееся тем, что дополнительно содержит модуль (9) вероятностной оценки фазы сигнала, связанный с выходом модуля (8) расчёта фазы сигнала и содержащий последовательно связанные между собой буфер (10) обработки множества мгновенных значений фазы сигнала, выполненный с возможностью работы по принципу FIFO, блок (11) формирования вариационного ряда A2 из множества мгновенных значений фазы сигнала, блок (12) определения математического ожидания и фильтр (13) нижних частот, при этом модуль (9) вероятностной оценки фазы сигнала выполнен с возможностью получения на его выходе значения F2 фазы сигнала.

2. Способ определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера в устройстве определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера по п.1, включающий получение сигнала ультразвукового датчика расходомера, его аналогово-цифровое преобразование, выделение квадратурных составляющих сигнала и расчёт фазы сигнала с получением мгновенного значения фазы сигнала, отличающийся тем, что дополнительно оценивают фазу ультразвукового сигнала на основе вероятностной модели, для чего накапливают результаты K расчётов мгновенного значения фазы φ_i , где $i = \overline{0, K-1}$, сигнала в течение заданного интервала времени, формируют из них вариационный ряд в виде ранжированной по возрастанию матрицы-строки

$$\Phi^v = \{\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{K-1}\},$$

где $\varphi_0 < \varphi_1 < \varphi_2, \dots < \varphi_{K-1}$,

перемножают вариационный ряд с матрицей

$$P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_{K-1}\}$$

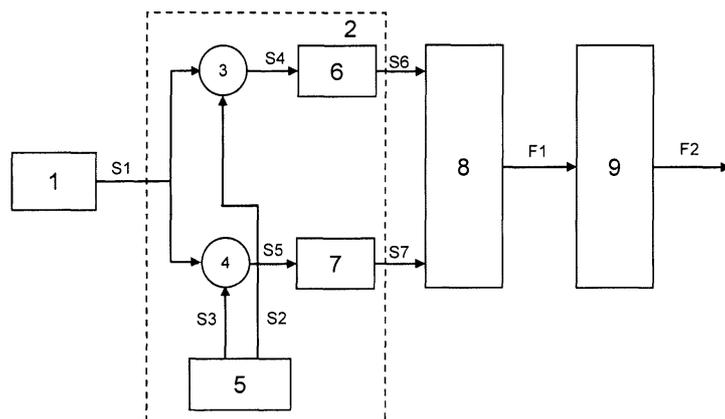
весовых коэффициентов p_i , где $i = \overline{0, K-1}$, соответствующих дискретным значениям плотности вероятности распределения шума, определяют математическое ожидание, соответствующее оценке фазы сигнала, путём суммирования результатов перемножения

$$\hat{\varphi} = \sum_{i=0}^{K-1} (\Phi_i^v P_i)$$

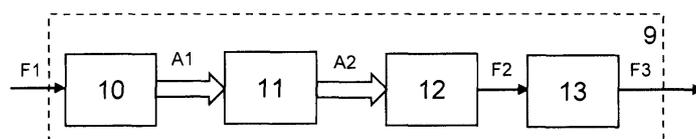
и сглаживают во времени результаты оценки фазы сигнала.

3. Способ по п.2, отличающийся тем, что значения плотности вероятности распределения шума определяют экспериментально в зависимости от факторов, выбранных из группы, включающей, по меньшей мере, тип ультразвукового датчика, схемотехническое решение устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера и расходомера в целом, параметры элементной базы устройства определения фазы сигнала ультразвукового датчика расходомера и расходомера в целом.

4. Способ по п.2, отличающийся тем, что количество результатов K измерений мгновенного значения фазы сигнала определяют по правилу Стёрджеса.



Фиг. 1



Фиг. 2

