

УДК 621.3.082.4

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-94-100

Тенденции совершенствования современных ультразвуковых расходомеров

В.Д. Глушнев, М.М. Панов

Для измерения расхода жидкости и других веществ, протекающих в трубопроводах, используют специализированные измерительные приборы — расходомеры. Ввиду большого числа разных по содержанию требований, предъявляемых к расходомерам, были разработаны и реализованы разнообразные методы измерения расхода, применяющиеся в зависимости от физико-химических свойств вещества, протекающего по трубе, требований к метрологическим характеристикам, простоты конструкции самого измерительного устройства и его обслуживания.

Ультразвуковой метод измерения — один из перспективных и быстроразвивающихся методов измерения расхода жидкостей. Ему присущи высокая надежность и точность, измерение расхода непроводящих жидкостей, а также возможность измерений без нарушения целостности стенок трубопровода. Наряду с этим, он обладает специфичными особенностями и проблемами, с которыми неизбежно сталкиваются все разработчики ультразвуковых расходомеров (УЗР).

Проанализированы основные составляющие погрешности ультразвуковых расходомеров (гидродинамическая погрешность, погрешность измерения интервалов времени и разности времен распространения и др.), рассмотрены методы повышения их точности, используемые в современных УЗР, а также пути дальнейшего совершенствования.

Основная цель данной работы — обзор текущего уровня развития и возможностей совершенствования данного метода, знакомство с крупными фирмами-производителями ультразвуковых расходомеров, их выпускаемыми приборами, применяемыми конструктивными и схемотехническими решениями.

Статья актуальна для тех, кто нуждается в оценке возможностей ультразвуковых расходомеров, перспективах их применения, стремится разработать высокоточный ультразвуковой расходомер, обладающий улучшенными метрологическими характеристиками.

Ключевые слова: ультразвуковой метод измерения расхода, ультразвуковой сигнал, коэффициент гидродинамической поправки, расход жидкости, разрешающая способность точность измерений, пьезоэлектрический преобразователь.

Для цитирования: Глушнев В.Д., Панов М.М. Тенденции совершенствования современных ультразвуковых расходомеров // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 94—100. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-94-100.

Trends in Improvement of Modern Ultrasonic Flowmeters

V.D. Glushnev, M.M. Panov

Special measuring instruments — flowmeters — are used to measure the flowrates of various fluids moving in pipelines. In view of a large number of different requirements for flowmeters, various flow measurement methods have been developed and implemented, which are applied depending on the physicochemical properties of the fluid flowing through a pipe, requirements for metrological characteristics, and the simplicity of measuring device design and its maintenance.

The ultrasonic measurement method is one of the most promising and intensely developing liquid flowrate measuring methods. It features high reliability and accuracy, ability to measure the flowrate of non-conducting fluids, and the possibility to perform measurements without upsetting the pipeline wall integrity. At the same time, the use of this method involves certain specific features and problems that are inevitably encountered by all developers of ultrasonic flowmeters.

The article analyzes the main error components in the measurement results obtained using ultrasonic flow meters (such as the hydrodynamic error, time interval measurement error, error in measuring the difference of propagation times, etc.), examines the methods for improving their accuracy that are used in the modern ultrasonic flow meters, and discusses the ways of their further improvement.

The study is primarily focused at reviewing the current state of the art in the development of this method and the possibilities for its further improvement, and providing some information about the major companies producing ultrasonic flowmeters, the instruments manufactured by them, and the applied design and circuit engineering solutions.

The article is relevant for the readers who need information about the possibilities of ultrasonic flowmeters and about the prospects of using them, and who are striving to develop a high-precision ultrasonic flowmeter with improved metrological characteristics.

Key words: ultrasonic flow measurement method, ultrasonic signal, hydrodynamic correction coefficient, fluid flowrate, resolution, measurement accuracy, piezoelectric transducer.

For citation: Glushnev V.D., Panov M.M. Trends in Improvement of Modern Ultrasonic Flowmeters. MPEI Vestnik. 2018;3:94—100. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-94-100.

Ультразвуковой метод измерения расхода (УЗМ), как в России, так и в зарубежных странах начал интенсивно развиваться в 1960 — 1980 гг. прошлого столетия и привлек пользователей следующими достоинствами:

- отсутствием подвижных механических частей и частей, выступающих в поток жидкости (как следствие, отсутствием потерь давления на первичном преобразователе и его высокой надежностью);
- возможностью измерения расхода непроводящих жидкостей, таких как нефть и нефтепродукты;
- возможностью бесконтактного измерения расхода (установки ультразвуковых датчиков с наружной стороны трубопровода без нарушения целостности его стенок);
- способностью к косвенной градуировке ультразвуковых расходомеров (расчету градуировочной характеристики по результатам обмера геометрических параметров первичного преобразователя расходомера (ППР)).

Анализ деятельности ведущих производителей и разработчиков ультразвуковых расходомеров показывает, что основными направлениями развития УЗМ остаются:

- разработка высокоточных расходомеров (с погрешностью 0,1...0,3 %);
- снижение стоимости расходомеров при сохранении средней точности, достаточной для массового применения на энергетических объектах и в коммунальном хозяйстве (погрешность не более 2 % в широком диапазоне измерений).

При этом используются схемы, так называемых «времяпролетных» ультразвуковых расходомеров (УЗР), которые назовем времяразностными¹.

На рисунке 1 изображена обобщенная схема времяразностного УЗР, где пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) (выполняющие функции приемопередатчиков ультразвуковых сигналов (УЗС)), установленные вдоль оси или под углом к оси трубопровода, поочередно излучают УЗС то по потоку жидкости, то против него.

Движущаяся жидкость увлекает ультразвуковую волну и ее скорость (для неподвижного наблюдателя) складывается со скоростью жидкости, что приводит

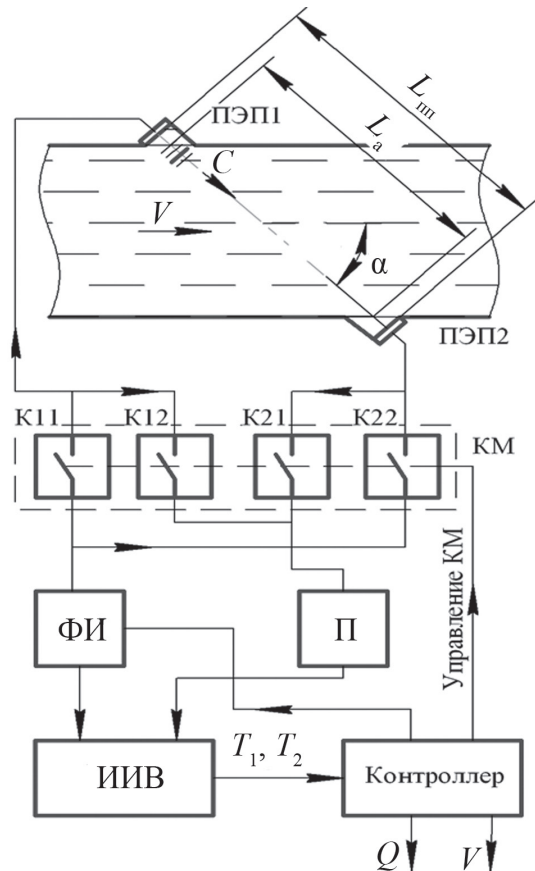


Рис. 1. Обобщенная схема времяразностного УЗР

к увеличению времени распространения УЗС, движущихся против потока, и к уменьшению времени распространения УЗС, движущихся по потоку:

$$T_{1,2} = \frac{L_a}{C \pm v_1 \cos \alpha} + \frac{L_k}{C}, \quad (1)$$

где $T_{1,2}$ — времена распространения УЗС в акустическом тракте расходомера; L_a — активная база, часть пути ультразвукового сигнала, на котором скорость жидкости отлична от нуля; C — скорость ультразвука (УЗ) в неподвижной жидкости; v_1 — средняя по длине луча ультразвука скорость жидкости; α — угол распространения ультразвуковой волны в трубопроводе; L_k —

¹В английской транскрипции «Time Of Flight» правильно отображает сущность метода измерения, в русском же звучании напоминает о быстротечности времени, а не о времени распространения сигналов.

длина пути УЗ в карманах ПЭП (полостях, образованных гнездами ПЭП);

Следует отметить, что скорость жидкости, измеряемая вдоль луча ультразвука, в общем случае не равна средней скорости жидкости по сечению трубопровода v_S :

$$v_S = \frac{Q}{S} \neq v_1; \quad v_1 = \frac{1}{L_a} \int_l (v dl); \quad v_1 = K_r v_S,$$

где Q — расход жидкости; S — площадь поперечного сечения трубопровода; K_r — коэффициент гидродинамической поправки, зависящий от распределения скоростей в поперечном сечении трубопровода.

Коммутация направления излучения и приема УЗС осуществляется с помощью коммутатора (КМ), содержащего выходные К11, К22 и входные К12, К21 ключи. Измеритель интервалов времени (ИИВ) измеряет интервал времени $T_{\Sigma 1}$ и $T_{\Sigma 2}$ между импульсом возбуждения на выходе формирователя импульсов (ФИ) и принятым импульсом на выходе приемника (П). Помимо измеренных времен T_1 и T_2 , данный интервал времени включает в себя дополнительную задержку сигналов в мембранах ПЭП1 и ПЭП2, а также в сигнальных кабелях и электронном тракте расходомера:

$$T_{\Sigma 1,2} = T_{1,2} + t_{d1,2}.$$

Из выражения (1) следует, что разность времен распространения $T_2 - T_1$ пропорциональна скорости жидкости, а, следовательно, и измеряемому расходу:

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = T_{\Sigma 2} - T_{\Sigma 1} - (t_{d2} - t_{d1}) = \frac{2L_a \cos \alpha}{C^2} v_1. \quad (2)$$

Различие задержек $t_{d1,2}$ по сравнению с временами невелико (для современных расходомеров не превышает 1...2 нс), а сами задержки в достаточной степени стабильны и могут быть скомпенсированы расчетным путем. Скорость ультразвука с достаточной степенью точности вычисляется по результатам измерения времен распространения УЗС:

$$C^2 = \frac{L_{\text{ин}}^2}{T_1 T_2}, \quad (3)$$

где $L_{\text{ин}} = L_a + L_k$.

С учетом сделанных замечаний и выражений (2), (3), можно определить градуировочную функцию и алгоритм вычисления (реализуется в контроллере расходомера, согласно рис. 1) расхода Q в следующем виде:

$$Q = \frac{\pi D^2 L_{\text{ин}}^2}{8 K_r L_x} \frac{\Delta T}{(T_{\Sigma 1} - t_{d1})(T_{\Sigma 2} - t_{d2})}, \quad (4)$$

где $L_x = L_a \cos \alpha$ — расстояние между точками ввода УЗ в трубопровод вдоль его оси.

Аналогичные выражения для функции преобразования были получены в работах [1 — 3], но, по нашему мнению, приведенные форма градуировочной функции (4) и обобщенная схема более точно отражают сущность ультразвукового метода измерения расхода. Вне зависимости от формы ультразвуковых сигналов, представления времени распространения УЗС и способов его измерения² все УЗР времяразностного типа и содержат элементы, изображенные на рис. 1. Более того, для устранения влияния скорости ультразвука на результат измерения во всех приборах данного типа следует измерять времена распространения УЗС между поверхностями ПЭП, контактирующими с жидкостью, а вычисление расхода проводить согласно (4). В случае использования накладных ПЭП дополнительно следует учитывать зависимость угла излучения от отношения скоростей ультразвука в жидкости и звукопроводе.

Формула (4) позволяет проанализировать возможные погрешности УЗР. При известных отклонениях параметров первичного преобразователя расходомера от своих номинальных значений и известной погрешности ИИВ изменение результата измерения УЗР будет выглядеть следующим образом:

$$\delta_Q = \frac{\Delta Q}{Q} = \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta L_{\text{ин}}}{L_{\text{ин}}} - \frac{\Delta L_x}{L_x} - \frac{\Delta K_r}{K_r} - \frac{2\Delta(T)}{T} + \frac{\Delta(\Delta T)}{T},$$

где δ_Q — прогнозируемая относительная погрешность измерения расхода; ΔD , $\Delta L_{\text{ин}}$, ΔL_x — заданные абсолютные отклонения (погрешности) геометрических параметров первичного преобразователя расхода от соответствующих номинальных параметров, имевших место при калибровке прибора (данные параметры могут меняться в процессе эксплуатации или быть неточно определены при косвенной градуировке); ΔK_r — заданное отклонение коэффициента гидродинамической поправки K_r ; $\Delta(T)$, $\Delta(\Delta T)$ — заданные погрешности измерения времени распространения и разности времен распространения УЗС.

При расчетах реальной погрешности УЗР точные значения рассмотренных составляющих погрешностей неизвестны и в большинстве случаев заданы в виде некоторых предельных значений. Их объединение (суммирование) проводится согласно известным моделям [4].

Одна из самых существенных погрешностей УЗМ — погрешность за счет неопределенности коэффициента гидродинамической поправки K_r (гидродинамической составляющей погрешности). Его значение существенным образом зависит от эюры скоростей, которая определяется характером течения жидкости, наличием местных гидравлических сопротивлений, отложения на стенках и их шероховатостью.

² До настоящего времени в технической литературе можно было встретить следующие типы УЗР: время- и фазоимпульсный, фазовый, частотно-импульсный, кратноточный. Все они реализуют времяразностный метод измерения.

Для устранения этой погрешности производители высокоточных УЗР используют многолучевые схемы первичных преобразователей. В этих приборах, проходит приближенное интегрирование эпюры скоростей (определение потока вектора скорости через сечение трубопровода):

$$Q = \int_S v ds \approx \sum_{i=1}^N v_{li} s_i,$$

где v_{li} — скорость жидкости вдоль i -го луча ультразвука; s_i — площадь сегмента поперечного сечения трубопровода, внутри которого v_{li} равна его средней скорости.

Точность такого интегрирования зависит от количества лучей N , их расположения в трубопроводе и правильности определения коэффициентов s_p , которые, в свою очередь, определяются эпюрой скоростей и возможными ее искажениями³. Для осесимметричных потоков применение уже двух лучей позволяет снизить гидродинамическую погрешность до 0,5 % в широком диапазоне изменений числа Рейнольдса и шероховатости стенок [5]. Ультразвуковые расходомеры с погрешностью 0,3 % (в диапазоне расходов 1:10) содержат, как правило, не менее 3 лучей, с погрешностью 0,1...0,15 % — 5...6 лучей.

Устранение гидродинамической погрешности напрямую связано с решением важной метрологической задачи: определением идентичности условий калибровки и условий эксплуатации. В условиях эксплуатации эпюра скоростей по ряду причин (неравномерные отложения, несоосность участков трубопровода при монтаже и т.п.) может существенно отличаться от эпюры скоростей, имеющей место при калибровке и проверке расходомера. Ряд современных высокоточных расходомеров (не только ультразвуковых) обладают функцией оценки эпюры скоростей. Одним из таких приборов является расходомер ООО «ЕНХА» [6]. В нем расход измеряется с помощью 32 перекрещивающихся лучей, которые позволяют не только снизить гидродинамическую погрешность, но и определить возможные изменения эпюры скоростей потока в процессе эксплуатации и получить оценку достоверности результата измерения.

Снижение гидродинамической погрешности в «бюджетных» УЗР, доступных по цене широкому контингенту потребителей, также достигается применением многолучевых схем, которые в отличие от классических многолучевых УЗР используют не более 2 пар ПЭП. Увеличение числа лучей в этих расходомерах достигается с помощью акустических зеркал, которые изменяют направление первоначального излучения, обеспечивая распространение ультразвука по хордам, смещенным относительно центра трубы.

Подобные схемы реализуются многими зарубежными и отечественными производителями (Kamstrup,

Landis&Gyr, Hydrometer, Siemens, ОАО «Завод «Старорусприбор»). При использовании отражателей требуются меры по борьбе с отложениями на их поверхности. Эксплуатация приборов при наличии в воде неустойчивых солей, взвесей и твердых частиц становится проблематичной. Кроме того они лишаются преимущества отсутствия выступающих в поток частей. Другой способ уменьшения зависимости от эпюры скоростей — использование проточной части специальной формы, позволяющей уменьшить влияние искажений в потоке на эпюру скоростей в створе ПЭП.

Важное направление совершенствования УЗР — разработка электронных схем, помогающих упростить приемно-генерирующий тракт и повысить точность измерения времен распространения ультразвуковых сигналов. Из градуировочной характеристики УЗР (4) следует, что погрешность измерения разности времен распространения не должна превышать $(20...50) \cdot 10^{-12}$ с, что составляет $(2...5) \cdot 10^{-5}$ от периода собственных колебаний ПЭП. Для устранения влияния амплитуды УЗС на точность измерения момент приема сигнала определяют по моменту пересечения одной из волн УЗС нулевого уровня, при этом в результат измерения вводится поправка на смещение данного момента относительно истинного начала УЗС. Для сигналов прямого и обратного направлений эта поправка одинакова и может быть учтена в виде константы. Одной из основных составляющих погрешности измерения времени в УЗР является погрешность за счет шумов, воздействующих на сигнал, она может быть вычислена по формуле

$$\Delta t_n = \frac{1}{a_{s/n} 2\pi f_{УЗС}},$$

где $a_{s/n}$ — отношение сигнал-шум; $f_{УЗС}$ — частота заполнения ультразвукового импульса (типичная форма ультразвукового импульса приведена на рис. 2).

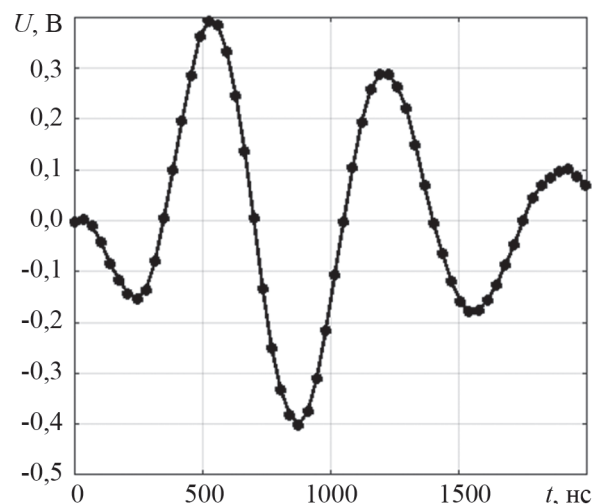


Рис. 2. Форма УЗС при возбуждении ПЭП коротким импульсом

³Формула (4) справедлива для неперекрывающихся сегментов (лучей), расположенных в параллельных плоскостях, в случае перекрещивающихся лучей следует учитывать коэффициент перекрытия сегментов.

С учетом сделанных ранее замечаний для обеспечения оговоренной точности измерений отношение сигнал–шум должно быть больше $(3...5) \cdot 10^3$, что для реальных электронных схем и существующих ПЭП не представляется возможным. Таким образом, во всех ультразвуковых расходомерах, наряду с фильтрацией УЗС, для уменьшения случайной составляющей погрешности проводят усреднение результатов измерений, что увеличивает динамическую погрешность расходомеров.

При этом приходится учитывать следующий фактор: недопустимы как слишком высокая частота зондирования потока (с целью получения большого числа результатов измерения), так и слишком низкая. В первом случае возрастает амплитуда акустических шумов, вызванных реверберацией акустического канала (многократным «эхо»). Во втором случае — возрастает, так называемая межтактовая асимметрия, вызванная изменениями параметров электроакустического тракта во времени, при наличии турбулентных пульсаций скорости, температуры и давления жидкости в створе луча ультразвука.

Для того чтобы увеличить число усредняемых измерений, в современных УЗР момент приема сигнала определяется по моменту перехода через «0» нескольких волн в одном ультразвуковом импульсе. Возбуждение ПЭП в этом случае проводят протяженной последовательностью импульсов с частотой, равной резонансной частоте ПЭП. Примером могут служить микросхемы УЗР, разработанные такими фирмами, как Maxim, Texas Instruments и АСАМ-messelectronics. Эти микросхемы полностью реализуют ультразвуковой метод измерения расхода, а измерение времени распространения осуществляется путем усреднения 8...10 моментов перехода сигналом «нулевого» уровня. Примечательно, что все указанные фирмы презентуют разрешающую способность по времени для разработанных микросхем равную 20 пс.

Для измерения интервалов времени с указанной разрешающей способностью в УЗР используют специальные методы: выделения и «растяжки» дробной части интервала времени, калибруемых цифровых линий задержки [7]. Следует отметить, что случайная погрешность, вызванная шумами в принимаемых сигналах, для указанных микросхем УЗР остается достаточно высокой. Проведенные натурные испытания отладочного модуля фирмы Maxim показали, что случайная составляющая погрешности (СКО) одноразового измерения разности времен распространения составляет 500...800 пс. Аналогичными характеристиками точности обладают и современные УЗР, не использующие интегрального исполнения, однако использова-

ние микросхем УЗР существенно снижает затраты на производство данных расходомеров и дает им существенное конкурентное преимущество, кроме того УЗР интегрального исполнения имеют чрезвычайно низкое потребление и используют, как правило, автономное питание. Именно этим можно объяснить недостаточно высокое отношение сигнал–шум, поскольку амплитуда возбуждающего напряжения в этих микросхемах не превышает 2 В.

Одним из перспективных направлений повышения точности измерения времени распространения УЗС считается использование различных методов, реализуемых путем цифровой обработки сигналов (ЦОС). Цифровая обработка позволяет путем оценки качества сигналов тестировать условия эксплуатации и определять достоверность полученных результатов измерения, а также диагностировать работоспособность узлов расходомера. Неслучайно одна из ведущих фирм по производству микроконтроллеров Texas Instruments анонсировала выпуск микросхемы УЗР с ЦОС [8].

В УЗР с ЦОС принимаемые сигналы с помощью быстродействующего аналого-цифрового преобразователя преобразуются в цифровую последовательность отсчетов. При этом каждый отсчет этой последовательности связан с i -м тактом образцовой частоты и совместно с другими отсчетами несет информацию о времени распространения УЗС. Каждый из отсчетов определен с некоторой случайной погрешностью, поэтому результаты вычисления момента переход сигнала нулевого уровня (например, методом линейной интерполяции) также будут содержать погрешность. Для ее уменьшения используют разнообразные методы цифровой обработки, наиболее известные из них:

- вычисление оценки⁴ взаимной корреляционной функции (ВКФ) с сигналом-эталоном (заданным в виде числовой последовательности). Глобальный максимум полученной ВКФ соответствует временному сдвигу между началом «оцифровки» УЗС и моментом его приема;

- вычисление ВКФ между оцифрованными УЗС, излученными по потоку и против потока жидкости. Глобальный максимум ВКФ соответствует разности времен распространения УЗС по потоку и против потока жидкости;

- обнаружение сигналов при низком отношении сигнал–шум⁵ возможно с помощью вычисления автокорреляционной функции (АКФ) для числовой последовательности, полученной при приеме сигнала в заданном окне, перемещаемом во времени. Начало УЗС будет соответствовать положению окна, при котором АКФ достигает максимума. Кроме того, АКФ позволяет оценить уровень и характер шума, определяющих условия эксплуатации прибора.

⁴ В силу ограниченности числовых последовательностей при вычислении свертки получают только одну из возможных реализаций (оценок) корреляционной функции (КФ), для краткости полученные свертки обозначим, как КФ.

⁵ Может иметь место для УЗР с накладными ПЭП, устанавливаемыми с наружной стороны трубопровода

Дополнительно к вычислению корреляционных функций (или совместно с ними) для повышения точности УЗР могут быть использованы методы цифровой фильтрации сигналов, позволяющие не только снизить уровень шумов в исходной последовательности отсчетов, но и провести цифровую интерполяцию сигнала вблизи перехода им нулевого уровня.

Применение ЦОС в ультразвуковых расходомерах имеет ряд особенностей. С одной стороны, не требуется обрабатывать сигналы в реальном масштабе времени, что позволяет реализовывать сложные процедуры обработки сигналов (например, с помощью фильтров высокого порядка). С другой стороны, требуется относительно высокая частота дискретизации, так как ПЭП, используемые в УЗР жидкости, имеют, по ряду причин, резонансную частоту 0,5...2 МГц. Появляющиеся в настоящее время микроконтроллеры со встроенными быстродействующими АЦП 8...12 МГц открывают перспективу разработки УЗР, обладающих высокими метрологическими характеристиками и конкурентно способных по цене с УЗР других типов.

С целью оценки эффективности алгоритмов цифровой обработки сигналов (при относительно низких частотах дискретизации) проведено математическое моделирование процесса измерения времени распространения путем вычисления корреляционных функций. Установлено, что на точность измерения (кроме отношения $a_{v/m}$) существенное влияние оказывают частотный спектр шума, форма сигнала, частота дискретизации и объем выборки. Предложено оценивать эффективность цифровой обработки с помощью коэффициента фильтрации $K_F = \Delta t_{n0} / \Delta t_{dsp}$, где Δt_n — составляющая погрешности формирования интервала времени, вызванная шумами в сигнале, при использовании аналогового метода перехода сигналом нулевого уровня; Δt_{dsp} — составляющая погрешности измерения времени распространения УЗС с помощью ЦОС.

Проведенное моделирование показало, что при частоте дискретизации, в 10 раз превосходящей частоту УЗС только за счет вычисления ВКФ, можно уменьшить указанную погрешность 11 раз, что в большинстве случаев вполне достаточно для построения высокоточных УЗР с малой динамической погрешностью [9, 10].

Таким образом, одним из основных направлений совершенствования УЗМ является применение многолучевых УЗР и устранение погрешности за счет неопределенности эпоры скоростей. Другое не менее важное направление улучшения показателей точности и цены УЗР — разработка специализированных микросхем, полностью реализующих алгоритм ультразвукового метода измерения.

Наиболее универсальным и гибким методом измерения интервалов времени в УЗР считается метод ЦОС, позволяющий не только повысить точность измерения, но и проводить тестирование условий эксплуатации и

диагностику работоспособности расходомеров, улучшая достоверность результатов измерения.

Литература

1. Биргер Г.И., Бражников Н.И. Ультразвуковые расходомеры. М.: Metallurgiya, 1964.
2. Thompson E.J. Mid-radius Ultrasonic Flow Measurement // Proc. Intern. Flow Meas. Conf., 1978. Pp. 153—161.
3. Антонов Н.Н., Дмитриев Е.В., Решетников В.А. Многоканальный частотно-временной ультразвуковой расходомер // Измерительная техника. 1976. № 10. С. 45—46.
4. ПМГ 96—2009. Результаты и характеристики качества измерений.
5. Лобачев П.В., Мясников В.И. Снижение гидродинамической погрешности ультразвуковых расходомеров // Измерительная техника. 1981. № 11. С. 38—39.
6. Банк данных All-Pribors. Преобразователи расхода жидкости ультразвуковые [Электрон. ресурс] DFX-MM <http://www.all-pribors.ru/opisanie/57471-14-dfx-mm-dfx-lv-61420> (дата обращения 05.04.2017).
7. ACAM-messelectronic gmbh. TDC-GP22. Универсальный двухканальный времяцифровой преобразователь специально для ультразвуковых счетчиков расхода воды. [Официальный сайт] http://acam-e.ru/pdf/DB_GP22_ru.pdf (дата обращения 12.05.2017).
8. Texas Instruments. MSP430FR6047. Ultrasonic Sensing MSP430™ Microcontrollers for Water Metering Applications [Официальный сайт] <https://www.ti.com/product/MSP430FR6047> (дата обращения 11.03.2017).
9. Texas Instruments. Digital Signal Processors TMS320F2809. Data Manual. [Официальный сайт] <https://www.ti.com/lit/ds/sprs230n/sprs230n.pdf> (дата обращения 11.03.2017).
10. Gerasimov S., Glushnev V., Panov M. Trends in the Development of an Ultrasonic Method for the Liquid Flow Measuring // Proc. IEEE 2nd Intern. Conf. Appl. Information Techn. Renewable Energy Processes and Systems. Amman, 2017.

References

1. Birger G.I., Brazhnikov N.I. Ul'trazvukovye Raskhodometry. M.: Metallurgiya, 1964. (in Russian).
2. Thompson E.J. Mid-radius Ultrasonic Flow Measurement. Proc. Intern. Flow Meas. Conf., 1978:153—161.
3. Antonov N.N., Dmitriev E.V., Reshetnikov V.A. Mnogokanal'nyy Chastotno-vremennoy Ul'trazvukovoy Raskhodomer. Izmeritel'naya Tekhnika. 1976;10:45—46. (in Russian).
4. PMG 96—2009. Rezul'taty i Kharakteristiki Kachestva Izmereniy. (in Russian).
5. Lobachev P.V., Mясников V.I. Snizhenie Gidrodinamicheskoy Pogreshnosti Ul'trazvukovykh Raskhodomerov. Izmeritel'naya Tekhnika. 1981;11:38—39. (in Russian).

6. **Bank dannykh All-Pribors.** Preobrazovately Raskhoda Zhidkosti Ul'trazvukovye [Elektron. Resurs] DFX-MM <http://www.all-pribors.ru/opisanie/57471-14-dfx-mm-dfx-lv-61420> (Data Obrashcheniya 05.04.2017). (in Russian).

7. **ACAM-messelectronic gmbh. TDC-GP22.** Universal'nyy Dvukhkanal'nyy Vremyatsifrovoy Preobrazovatel' Spetsial'no dlya Ul'trazvukovykh Schetchikov Raskhoda Vody. [Ofits. Sayt] http://acam-e.ru/pdf/DB_GP22_ru.pdf (Data Obrashcheniya 12.05.2017). (in Russian).

8. **Texas Instruments.** MSP430FR6047. Ultrasonic Sensing MSP430™ Microcontrollers for WaterMetering Applications [Ofits. Sayt] <https://www.ti.com/product/MSP430FR6047> (Data Obrashcheniya 11.03.2017).

9. **Texas Instruments.** Digital Signal Processors TMS320F2809. Data Manual. [Ofits. Sayt] <https://www.ti.com/lit/ds/sprs230n/sprs230n.pdf> (Data Obrashcheniya 11.03.2017).

10. **Gerasimov S., Glushnev V., Panov M.** Trends in the Development of an Ultrasonic Method for the Liquid Flow Measuring. Proc. IEEE 2nd Intern. Conf. Appl.

Information Techn. Renewable Energy Processes and Systems. Amman, 2017.

Сведения об авторах

Глушнев Владимир Дмитриевич — кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники НИУ «МЭИ», e-mail: 6861094@mail.ru

Панов Михаил Михайлович — аспирант кафедры информационно-измерительной техники НИУ «МЭИ», инженер-исследователь 3 категории, АО «Российские космические системы», e-mail: panovmm93@mail.ru

Information about authors

Glushnev Vladimir D. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Information-Measuring Technique Dept., NRU MPEI, e-mail: 6861094@mail.ru

Panov Mikhail M. — Ph.D.-student of Information-Measuring Technique Dept., NRU MPEI, Research Engineer of 3rd category, JSC «Russian space systems», e-mail: panovmm93@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.06.2017