

# РЕАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСХОДОМЕРА ВОДЫ НА ОСНОВЕ ВРЕМЯ-ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА

Чижов Н.С. Email: Chizhov1134@scientifictext.ru

Чижов Николай Сергеевич – аспирант,  
кафедра электронных измерительных систем,  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

**Аннотация:** в связи с широким распространением расходомеров, потребность в точных, простых и дешевых устройствах становится особенно актуальной. В данной статье представлен ультразвуковой расходомер воды на основе время-импульсного метода. В качестве ядра устройства был использован микроконтроллер STM32, а для генерации ультразвуковых сигналов и последующего сбора разницы во времени их распространения применялся высокоточный преобразователь TDC-GP22. Главными преимуществами предлагаемой системы являются простота реализации и низкое энергопотребление. Проведенные испытания показывают хорошие результаты, что позволяет использовать данное решение в промышленности.

**Ключевые слова:** ультразвуковой расходомер; время-импульсный метод.

## REALIZATION OF AN ULTRASONIC WATER FLOWMETER BASED ON TRANSIT-TIME TECHNIQUE

Chizhov N.S.

Chizhov Nikolai Sergeevich – Graduate Student,  
DEPARTMENT OF ELECTRONIC MEASURING SYSTEMS,  
NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI, MOSCOW

**Abstract:** with the use of flowmeters in industry expanding rapidly, the demand of accurate, simple, and cheap devices is becoming increasingly urgent. This paper presents an ultrasonic water flowmeter with transit-time method. A low power microcontroller STM32 is used as the core of the device, and a high-precision converter TDC-GP22 is used to generate ultrasonic signals and collect the time difference. The proposed design has low power consumption and very simple hardware implementation, and as the experimental data shows is ready to be used in the industry.

**Keywords:** ultrasonic flowmeter; transit time method.

УДК 681.121.89.082.4

### 1. Введение

Применение ультразвуковых измерителей потока стремительно распространяется как в индустриальной среде, так и в медицине. Существует множество других методов измерения расхода жидкости, такие как турбины, трубки Вентури и другие, но применение ультразвуковых преобразователей имеет множество преимуществ [1]. Такая система не содержит движущихся частей, не создает дополнительного перепада давления и позволяет проводить двунаправленное измерение. Ее быстрый отклик позволяет производить измерения в переходных и пульсирующих потоках. Наконец, эта система может значительно снизить затраты на ее установку и обслуживание [2]. Кроме того, ультразвуковые измерители потока находят применение для измерений в жидкостях, газах и многофазных средах, хотя и не без ограничений [3].

Среди ультразвуковых методов измерения объемного расхода можно выделить два основных: доплеровский и время-импульсный методы. Метод измерения выбирается в зависимости от типа контролируемой среды. Среда, в свою очередь, может быть однофазной (гомогенной), либо многофазной (гетерогенной). Для измерения расхода гетерогенных сред лучше всего проходит доплеровский метод измерения, в основе которого лежит измерение частоты ультразвукового сигнала отраженного от движущихся неоднородностей. Для измерения расхода в однофазных средах лучше подходит время-импульсный метод измерения, в основе которого лежит изменение времени распространения ультразвукового импульса по потоку и против потока жидкости [4].

Для ввода акустических колебаний в поток и их дальнейшего считывания используются излучатели-приемники, выполненные на основе пьезокерамических элементов [5].

Рассматриваемый в статье расходомер должен проводить измерения для потока воды. Поскольку вода

является гомогенной средой, то в качестве метода измерения был выбран время-импульсный метод.

## 2. Принцип измерений

Ультразвуковые время-импульсные измерители основаны на посыле в акустический канал ультразвуковых сигналов по потоку и против него. Для этого используются два направленных друг на друга пьезокерамических преобразователя, каждый из которых по очереди выполняет роль приемника и передатчика. На распространение сигнала будет влиять протекающий со скоростью  $v$  поток, благодаря чему время распространения сигнала от вышестоящего передатчика А до нижестоящего приемника Б будет меньше, чем время распространения сигнала от нижестоящего передатчика Б до вышестоящего приемника А. Таким образом, разность во времени пролета между этими двумя сигналами будет прямо пропорциональна скорости потока  $v$ . Данный принцип схематически изображен на рисунке 1.

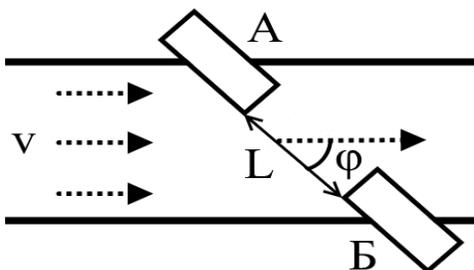


Рис. 1. Принцип время-импульсного метода

Время распространения сигнала вдоль потока можно выразить как

$$t_{up} = \frac{L}{c - v \cos \varphi} \quad (1)$$

а время распространения сигнала против потока как

$$t_{down} = \frac{L}{c + v \cos \varphi} \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние между передатчиками,  $v$  – скорость потока жидкости,  $c$  – скорость звука в среде. Тогда, интересующая нас разность имеет вид

$$t = t_{down} - t_{up} = \frac{2vL \cos \varphi}{c^2 - v^2 \cos^2 \varphi} \quad (3)$$

или, полагая  $v \ll c$

$$t \approx \frac{2vL \cos \varphi}{c^2} \quad (4)$$

откуда получается итоговая формула для скорости потока

$$v = \frac{c^2 t}{2L \cos \varphi} \quad (5)$$

В результате, формула объемного расхода в трубе диаметром  $D$  будет иметь вид

$$q = vS = \frac{c^2 t}{2L \cos \varphi} \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi c^2 t D^2}{8L \cos \varphi} \quad (6)$$

## 3. Общий вид устройства

Расходомер, как измерительное устройство, должен не только накапливать разности времен распространения сигнала, но также и осуществлять преобразования, вычисления, мгновенное отображение результата и его передачу на сервер. В качестве ядра, выполняющего перечисленные функции, был использован микроконтроллер с низким потреблением STM32. Структура устройства отображена на рисунке 2.



Рис. 2. Структурная схема рассматриваемого расходомера

Точность всего устройства определяется точностью, с которой осуществляется измерение разности во времени распространения ультразвуковых волн. В зависимости от скорости потока, эта величина может существенно отличаться. Типичные значения разности во времени составляют от единиц до сотен наносекунд. По этому, был необходим время-цифровой преобразователь обладающий высоким разрешением и широким диапазоном измерений.

Для осуществления прецизионных измерений времени распространения ультразвуковых волн был применен время-цифровой преобразователь TDC-GP22 производства компании Acam Messelectronic GmbH. Данный измеритель имеет высокое разрешение 22 псек и содержит схему генерации и детектирования импульсов, что значительно упрощает конечную схему устройства. Кроме того, микросхема преобразователя имеет малые физические размеры и низкое энергопотребление.

Измерение температуры воды реализовано при помощи двух термисторов. Для определения их сопротивления была использована функция измерения сопротивления PICOSTRAIN® преобразователя TDC-GP22. Данная технология позволяет с высокой точностью измерить относительное сопротивление элементов [6]. Для вычисления абсолютных величин сопротивлений термисторов при помощи их относительных значений, а затем и непосредственно температуры, был введен опорный резистор.

После выполнения измерений, микроконтроллер STM32 принимает данные от TDC-GP22 по серийному интерфейсу SPI, выполняет их обработку, устраняет шумы и производит подготовку результатов. Для взаимодействия с пользователем и выбора режима работы устройства были добавлены дисплей и кнопки, а также возможность удаленного взаимодействия посредством интерфейса передачи данных. Для сохранения результатов используется встроенное запоминающие устройство.

#### 4. Обработка данных

Данные, поступающие в микроконтроллер от время-цифрового преобразователя, представляют собой последовательность величин, измеренных в различные моменты времени с постоянным шагом. К сожалению, эти данные очень сильно зашумлены и потому непригодны к использованию в своем первоначальном виде. По этой причине необходимо провести их дополнительную обработку. Поскольку все результаты измерений разности времен распространения сигнала и сопротивлений термисторов представлены в цифровом виде, то обработка осуществляется исключительно программными средствами микроконтроллера.

Цифровая обработка сигналов, в сравнении с аналоговой, имеет ряд преимуществ, среди которых гибкость, стабильность и высокая надежность. Для определения конкретного типа фильтра и его коэффициентов для каждой величины был проделан ряд экспериментов, заключавшихся в проведении серий замеров для различных, заранее известных, скоростей потоков воды. Каждая серия включала в себя несколько сотен измерений, которые сохранялись на ПК для дальнейшего изучения. Пример нескольких последовательных измерений внутри одной серии приведен в таблице 1.

Таблица 1. Пример последовательности данных

Номер	Термистор 1, Ом	Термистор 2, Ом	$t_{up}$ , нс	$t_{down}$ , нс	$t$ , нс
1	824,13	992,13	262 990,750	263 041,969	51,219
2	824,13	992,13	262 986,531	263 059,438	72,907
3	824,22	992,23	263 005,812	263 038,625	32,813
4	824,22	992,23	263 009,750	263 028,844	19,094
5	824,22	992,23	262 995,906	263 046,719	50,813

Приведенные в таблице данные содержат всего 5 точек, но тем не менее наглядно демонстрируют общий характер измерений. Так, можно заметить, что сопротивления термисторов постоянны, а значит им не требуется сложная математическая обработка и достаточно простого скользящего среднего. Времена распространения сигнала же, напротив, серьезно подвержены шумам и требуют дополнительной программной фильтрации. Примеры исходных зашумленных и отфильтрованных данных приведены соответственно на рисунках 3 и 4.

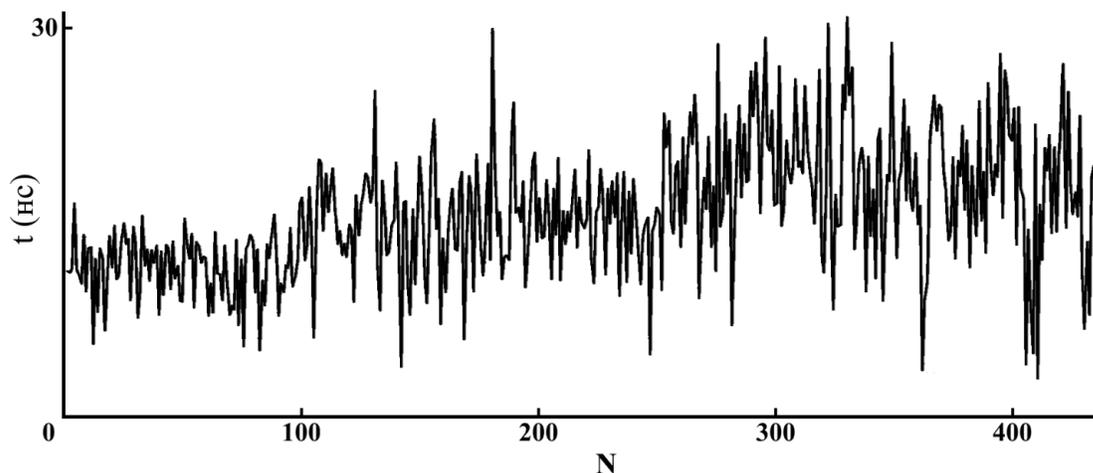


Рис. 3. Исходная серия измерений

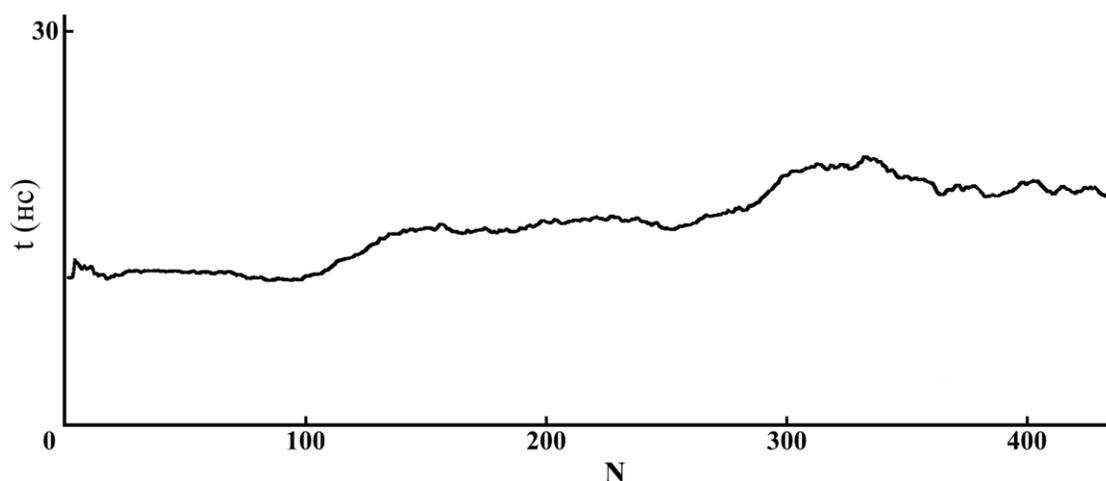


Рис. 4. Отфильтрованная серия измерений

Таким образом, после проведения процедуры фильтрации, полученный результат можно использовать для итогового вычисления расхода воды. Тем не менее, текущая цифровая обработка может содержать недостатки и требует более тщательной проверки в будущем.

#### 5. Заключение

Данная статья представляет реализацию ультразвукового расходомера воды основанного на время-импульсном методе, в основе которого лежит микроконтроллер STM32, а генерация импульсов и измерение их времени распространения осуществляется специализированным время-цифровым преобразователем TDC-GP22. Полученные данные обрабатываются при помощи программных методов и отображаются пользователю как непосредственно на устройстве, так и через удаленный сервер.

В будущем необходимо проведение полноценных метрологических испытаний, по результатам которых возможно понадобится незначительная корректировка параметров цифрового фильтра.

#### Список литературы / References

1. Mandard E., Kouame D., Battault R., Remenieras J.P., Patat F. Methodology for developing a high-precision ultrasound flow meter and fluid velocity profile reconstruction // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2008. Т. 55. № 1. С. 161-172.
2. Brassier P., Hosten B., Vulovic F. High-frequency transducers and correlation method to enhance ultrasonic gas flow metering // Flow measurement and instrumentation, 2001. Т. 12. № 3. С. 201-211.
3. Lynnworth L.C., Liu Y. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005 // Ultrasonics, 2006. Т. 44. С. e1371-e1378.

4. *Богуш М.В., Кузьмичева Е.В., Пикалев Э.Ж., Богуш А.М.* Пьезоэлектрические акустические преобразователи и ультразвуковые расходомеры газа на их основе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2010. № 2. С. 21-24.
5. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1989. 701 с.
6. Using PICOSTRAIN® with piezo-resistive sensors, Data Sheet, AN030\_e V0.0, Acam-Messelectronic GmbH, 2011.