

АКУСТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ ИСТ-1М РЕЧНОГО И МОРСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.Н. Греков, С.Ю. Алексеев

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

В статье проводится анализ существующих в мире измерителей скорости и направления течения, приводится краткое описание прибора ИСТ-1М, основных его модулей, а также его технические характеристики.

В настоящее время существует большое количество приборов для измерения скорости течения в морях, реках и каналах. Кратко представим в таблице 1 и проанализируем характеристики измерителей ведущих мировых компаний. Основной критерий анализа – это универсальность прибора (морского и речного назначения), а также преимущество методик измерения и постановок, которые формировались десятилетиями.

Практически все представленные приборы работают по принципу доплеровского сдвига частоты акустического сигнала. Исключение составляют измерители Valeport 106, 108, 308 – гидрологические вертушки, и Valeport Midas ECM с электромагнитным первичным преобразователем.

Таблица 1 – Приборы для измерения скорости течения

Фирма	Модель	Диапазон измерения, м/с	Погрешность	Разрешение, см/с
Falmouth Scientific, Inc.	3D ACM	0 ÷ 6	±2 % или ±1 см/с	0,01
	2D ACM	0 ÷ 6	±2 % или ±1 см/с	0,01
	3DWAVE	0 ÷ 3	±2 % или ±1 см/с	0,01
Nortek	Vector	до 7	±0,5 % или ±1 мм/с	–
	Vectrino	до 4	±0,5 % или ±1 мм/с	–
	Aquadopp	±3	±1 % или ±5 мм/с	–
SonTek/YSI	Triton-ADV	0,1 ÷ 4,8	±1 % или ±1 мм/с	0,01
	ADVOcean	до 5	±1 % или ±5 мм/с	0,1
	ADV	2,5	1%	0,01
	Argonaut-ADV	±0,001 ÷ 4,5	±1% или ±1 мм/с	0,01
	Argonaut-MD	±6	±1% или ±5 мм/с	0,01
	Flowtracker	±0,001 ÷ 4	±1% или ±2,5 мм/с	0,01
Aanderaa Data Instruments	9 LW/IW	0 ÷ 3	±1,5 мм/с	0,3
	RCM 11	0 ÷ 3	±1,5 мм/с	0,3
	4100 RA	0 ÷ 3	±1,5 мм/с	0,3
	4420/4520	0 ÷ 3	±1,5 мм/с	0,01
	Seaguard RCM	0 ÷ 3	±1,5 мм/с	0,01
Valeport Limited	106	0,03 ÷ 5	±1,5 %	–
	Midas ECM	0 ÷ 5	±1	1
	108,308	0,03 ÷ 5	±1,5 %	–
OTT Messtechnik	SLD	±10	±1 % или ±5 мм/с	–
	ADC	-0,2 ÷ 2,5	±1 % или ±2,5 мм/с	–

Измерители компании Falmouth Scientific, Inc. [1] предназначены для буйковых постановок и имеют хорошие метрологические характеристики. В них универсальная акустическая головка с шириной базы 14 см устанавливается в различных измерительных системах, включающих CTD и оптические каналы.

Указанный диапазон скорости течения для этих измерителей от 0 до 6 м/с, но из-за необтекаемости формы этих приборов, представленные на фотографиях способы использования приборов при скорости потока 6 м/с в реальных полевых условиях сомнительны.

Из группы измерителей компании Nortek [2] прибор Vector при измерительной базе порядка 15 см имеет те же недостатки, что и предыдущая группа. Прибор Vectrino этой же группы имеет измерительную базу 6 см и предназначен для установки на жесткой платформе и в лабораторных условиях. Прибор Aquadopp этой компании можно использовать при скорости потока до 3 м/с, однако он требует серьезных доработок в части крепления и обеспечения обтекаемости, т.е. фактически ему необходимо создать соответствующий носитель.

Группа приборов компании SonTek/YSI [3] аналогично приборам фирмы Nortek, внешне и по техническим характеристикам они очень похожи, как будто их проектировали одни и те же разработчики. Вызывает вопрос: как при скорости 6 м/с и габаритных размерах прибора (диаметром 12 см, длиной 0,7 м) можно проводить измерения на гибком тросе? Видимо, этот прибор предназначен для жесткой платформы.

Группа приборов компании Aanderaa Data Instruments при своих технических характеристиках [4] может быть использована для различных способов постановки. Разработанная акустическая измерительная головка диаметром 120 мм измеряет скорость течения в ближней зоне порядка 2 м при области тени 0,4 метра. Однако для малых глубин использовать эти приборы не представляется возможным.

Приборы модели 106, 108 и 308 компании Valeport [5] можно использовать при речных и морских измерениях вместо существующих механических вертушек. Однако эти приборы и являются механическими вертушками с дополнительными датчиками температуры, глубины и направления. Прибор Midas ECM этой компании является электромагнитным измерителем скорости течения и предназначен только для морских измерений скорости течения на соответствующих платформах.

Прибор ADC компании OTT Messtechnik [6] является измерителем с акустической головкой корреляционного типа. При своих хороших метрологических характеристиках у прибора есть ряд недостатков, заключающихся в том, что он должен работать на жесткой платформе или штанге, его глубина погружения не более 10 м, то есть фактически его можно использовать только на мелководье. Прибор SLD этой же

компании аналогичен прибору ADVOcean компании SonTek/YSI.

Из представленного анализа следует, что все приборы, кроме приборов фирмы Valeport (модели 106, 108 и 308), не могут использоваться взамен гидрометрических вертушек, так как они не охватывают весь диапазон разработанных и применяемых методик для определения скорости течения и расхода из-за своих конструктивных особенностей. Для использования этих приборов необходимы серьезные конструктивные доработки и разработка новых методик проведения измерения. Игнорирование этого факта, может привести к некорректным измерениям, и стыковать результаты новых измерений со старыми окажется невозможным из-за разности динамических характеристик, временного и пространственного усреднения.

С учетом этих замечаний, в отделе автоматизации был разработан макет прибора ИСТ-1М речного и морского применения взамен гидрометрических вертушек. Являясь векторным прибором, ИСТ-1М кроме измерения скорости и направления течения, температуры и глубины, имеет возможность измерять не только угол наклона прибора, но и, в отличие от перечисленных выше приборов, собственные движения по показаниям установленных в нем акселерометров.

Основной способ использования измерителя скорости течения – это автономный вариант, например, с постановкой на бую. Также существует возможность работы прибора в телеметрическом режиме.

На рисунке 1 представлена структурно-функциональная схема прибора в варианте подключение к ПЭВМ. Измерительный модуль состоит из микроконтроллера (МК), канала измерения скорости течения, в который входят время-цифровой преобразователь (ВЦП), генератор, усилители и пьезоизлучатели (ПИ-1, ПИ-2); канала измерения температуры на основе цифрового датчика температуры (t) компании Dallas Semiconductor [7]; канала измерения глубины на основе аналогового датчика абсолютного давления (P) компании Freescale Semiconductor [8]; канала определения собственных движений на основе акселерометра (A); канала определения направления течения на основе электронного компаса (ЭК) и преобразователя уровней (RS-232).

Предварительная обработка собранных данных и пересылка данных со всех измерительных каналов из измерительного модуля в ПЭВМ осуществляется микроконтроллером MSP430 компании Texas Instruments [10]. Этот микроконтроллер обладает сверхнизким энергопотреблением при хорошем быстродействии (330 μ A на 1 MIPS), имеет встроенный 12 разрядный АЦП, отвечает требованиям температурного режи-

ма измерителя (от минус 50 до плюс 85 °C), аппаратно поддерживает наиболее распространенные интерфейсы связи, которые используются для обмена данными с измерительными каналами и модулем хранения информации, имеет возможность внутрисхемного программирования Flash-памяти, что позволяет гибко изменять и обновлять программный код, производить регистрацию данных.

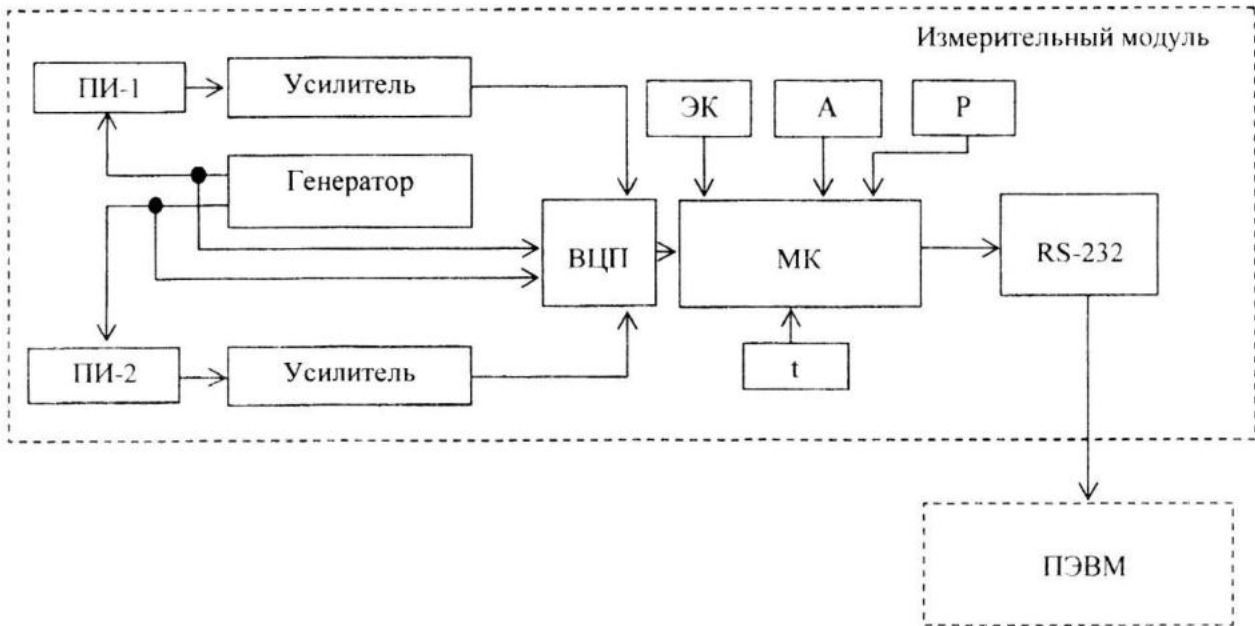


Рисунок 1 – Структурно-функциональная схема измерителя

Каналы измерения скорости течения, температуры и давления детально описаны в [11]. Остановимся подробнее на каналах определения собственных движений прибора и направления течения.

Канал определения собственных движений прибора базируется на трёхосевом ак-

селерометре фирмы STMicroelectronics [12], представляющим собой микроэлектромеханическую систему. Структурно-функциональная схема канала представлена на рисунке 2.

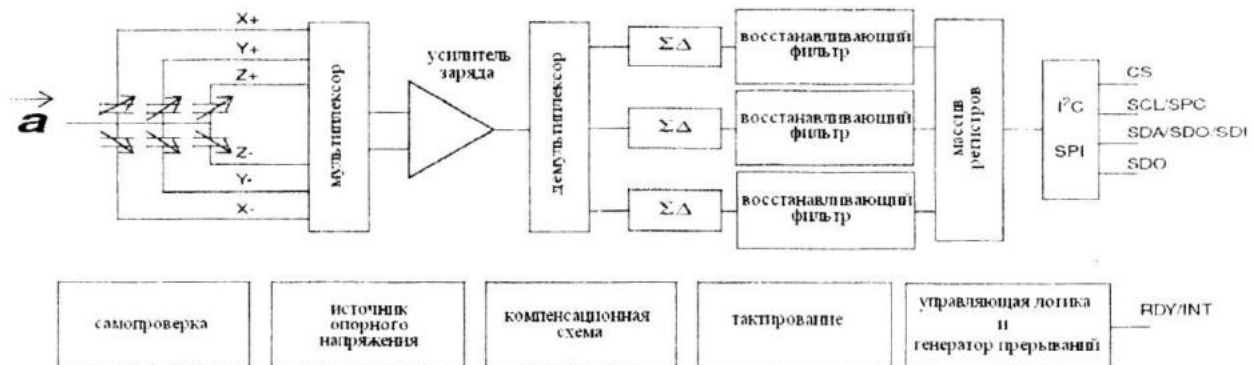


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема канала определения собственных движений измерителя

Сенсорный элемент, способный детектировать ускорение, выполнен с использованием процесса, получившего название THELMA (Thick Epi-Poly Layer for Microactuators and Accelerometers), позволяющего создавать поверхностные микромеханические структуры, прикрепляемые к подложке в нескольких анкерных точках, со способностью перемещаться в плоскости структуры [13, 14]. Эквивалентная схема сенсорного элемента представляет собой полумост, разбаланс которого при ускорении измеряется посредством интеграции заряда чувствительного конденсатора, питаемого импульсами напряжения.

Помимо сенсорного элемента в канал входит чип ASIC (Application-Specific Integrated Circuit). Чип состоит из малошумного усилителя заряда, который преобразует емкостной разбаланс сенсорного элемента в аналоговое напряжение. Полученный сигнал поступает на три сигма-дельта аналого-цифровых преобразователя, по одному на каждую ось, которые переводят аналоговое напряжение в цифровой поток битов. Далее информация поступает на три восстанавливающих фильтра, которые убирают высокочастотные компоненты шума квантования и обеспечивают цифровые слова с низкой частотой и высоким разрешением. Полученный результат сохраняется в массиве регистров, где помимо этого хранится различная вспомогательная информация, записанная микроконтроллером в процессе инициализации и настройки канала. Далее этот результат считывается микроконтроллером MSP430 по последовательному интерфейсу SPI.

Выбранный акселерометр полностью удовлетворяет техническим требованиям нашего измерителя: рабочий диапазон температур от минус 40 до плюс 85 °С, динамический диапазон $\pm 1,7$ g, разрешение 1 mg.

Канал определения направления течения базируется на интегрированном модуле компаса компании Honeywell [15]. В качестве датчика в нем используется двухосевой магнитно-резистивный сенсор.

Данный компас также полностью удовлетворяет техническим требованиям наше-

го измерителя: рабочий диапазон температур от минус 20 до плюс 70 °С, точность определения направления 2,5°, разрешение 1°. Приведенные паспортные характеристики обеспечиваются только при нахождении прибора в горизонтальной плоскости, при изменении его наклона точность ухудшается.

Для исключения ошибки определения направления течения из-за крена и тангажа прибора был предложен следующий алгоритм [16]. Сначала по показаниям акселерометров рассчитываются углы тангажа и крена по следующим формулам:

$$\theta = \arctan \left[\frac{X_{accel}}{\sqrt{X_{accel}^2 + Z_{accel}^2}} \right],$$

$$\phi = \arctan \left[\frac{Y_{accel}}{\sqrt{Y_{accel}^2 + Z_{accel}^2}} \right],$$
(1)

где θ – угол тангажа; ϕ – угол крена; X_{accel} – ускорение вдоль прибора; Y_{accel} – ускорение поперек прибора в горизонтальной плоскости; Z_{accel} – ускорение поперек прибора в вертикальной плоскости.

Затем проводится расчет проекции магнитных векторов на горизонтальную плоскость из показаний магнитных сенсоров по известным углам наклона прибора [17]. По полученным значениям X и Y проекций векторов рассчитывается азимут направления течения

$$Azimuth = \arctan(Y/X). \quad (2)$$

Поскольку на прибор может действовать линейное ускорение, что приведет к ошибке определения наклона прибора, и в свою очередь приведет к ошибке определения азимута, поэтому дополнительно производится проверка на наличие этого ускорения, то есть общее ускорение прибора должно быть близким к 1 g

$$a_{общее} = \sqrt{X_{accel}^2 + Y_{accel}^2 + Z_{accel}^2}. \quad (3)$$

Рассмотрим подробнее работу измерительного модуля. Блок-схема работы программного обеспечения встроеного в него контроллера представлена на рисунке 3.

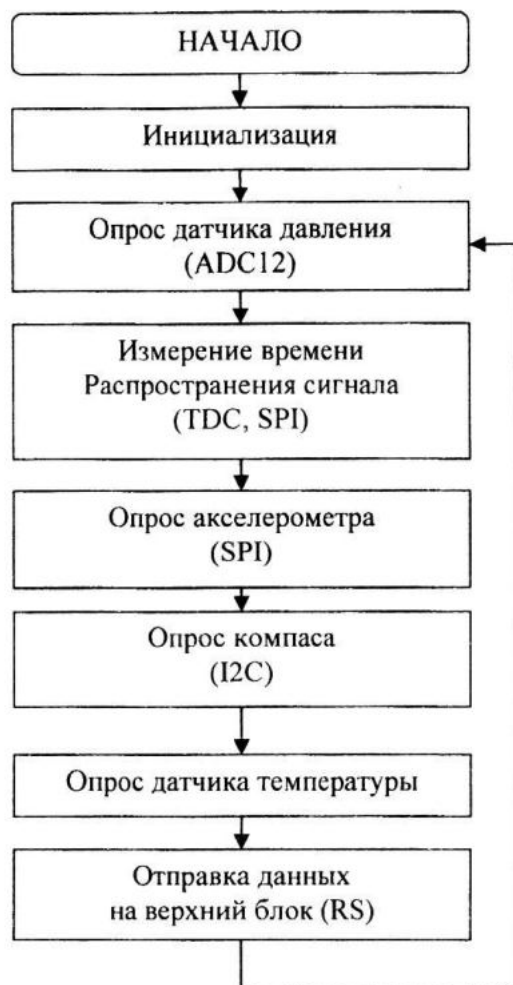


Рисунок 3 -- Алгоритм работы программы

Вся программа представляет собой блок инициализации и непрерывный цикл сбора данных. В блоке инициализации последовательно настраиваются модуль тактирования, все выходы микроконтроллера и периферийные устройства. Как видно из приведенного выше рисунка, процесс сбора данных происходит в последовательном опросе каждого модуля:

1) С помощью встроенного 12-разрядного АЦП преобразуется сигнал с аналогового датчика давления.

2) Затем, с помощью время-цифрового преобразователя измеряется время распро-

странения акустического сигнала в среде. Время-цифровой преобразователь передает данные по стандартному интерфейсу SPI.

3) По интерфейсу SPI опрашивается цифровой трехосевой акселерометр.

4) По интерфейсу I2C опрашивается цифровой компас.

5) Опрашивается цифровой датчик температуры.

6) Собранные данные отправляются одним кадром в модуль хранения информации.

Технические характеристики прибора представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные технические характеристики

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Погрешность	Случайная погрешность
Гидростатическое давление, кПа (глубина, м)	0 ÷ 250 (0 ÷ 25)	(±2 %)	0,006
Скорость течения, м/с	0,04 ÷ 5,00	±2 %	0,007
Температура воды, °С	-2 ÷ 35	±0,6	0,0625
Направление течения, град	0-360	±2,5	0,5
Собственное движение прибора (ускорение), g	±1,7	±6 %	0,001
Время работы в автономном режиме до 5 месяцев			
Глубина постановки до 500 м			

Заключение. Созданный макет акустического измерителя скорости и направления течения ИСТ-1М является современным автоматическим прибором универсального применения с возможностями и характеристиками, в основном не уступающими ни одному из выпускаемых приборов.

Л и т е р а т у р а

1. www.falmouth.com
2. www.nortek-as.com
3. www.sontek.com
4. www.aadi.com
5. www.valeport.co.uk
6. www.ott-hydrometry.de
7. www.maxim-ic.com
8. www.freescale.com
9. www.atmel.com
10. www.ti.com

11. Н.А. Греков, П.В. Гайский, В.Ж. Мишуров, А.С. Бондаренко. Переносной акустический измеритель скорости течения ИСТ-1 // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь, 2005. – С. 35–45.

12. www.st.com

13. Process for manufacturing high-sensitivity accelerometric and gyroscopic integrated sensors, and sensor thus produced. US Patent 6 184 051. Опубл. 06.02.2001 (STMicroelectronics, Inc.)

14. Process for manufacturing high-sensitivity capacitive and resonant integrated sensors, particularly accelerometers and gyroscopes, and sensors made therefrom. US Patent 6 184 052. Опубл. 06.02.2001 (STMicroelectronics, Inc.)

15. www.honeywell.com

16. AN005 Tilt-Sensing with Kionix MEMS Accelerometers, www.kionix.com

17. Michael J. Caruso. Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems // www.honeywell.com