РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа **83** с., **27** рис., **24** табл., **21** источник, **2** приложения.

Ключевые слова: измеритель течения, скорость течения, ультразвук, эхо-импульс, фазовый метод, микроконтроллер.

Объект исследования: фазовый метод обработки УЗ эхо-сигнала, применительно к задачам измерения параметров перемещения водных масс в водоемах с медленными течениями.

В процессе исследования проводились: анализ литературных источников, исследование методов измерения скорости и направления течения в водоемах и методов измерения скорости распространения звука, разработка макета измерителя скорости и направления течения в водоемах, разработка программного кода для управляющего микроконтроллера, отладка и тестирование выполненного макета устройства, анализ полученных данных, анализ ресурсосбережения и ресурсоэффективности, финансовый менеджмент, анализ социальной ответственности.

В результате исследования был спроектирован измеритель скорости и направления течения в водоемах, который соответствует техническому заданию. Была реализована автоматическая подстройка частоты генерируемых импульсов. Так же была осуществлена отладка измерителя.

Степень внедрения: исследование гидрологических процессов.

Область применения: научно-исследовательские организации и предприятия, области интересов которых затрагивают исследование гидрологических процессов в прибрежной зоне водоемов.

Введение 13
Глава 1. Обзор литературы 16
1.1 Методы измерения скорости течения воды 16
1.1.1 Средства электромеханического измерения 16
1.1.2 Средства электромагнитного измерения 18
1.1.3 Метод акустического измерения 19
1.2 Методы измерения времени распространения звука 22
1.3 Ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи 25
1.4 Микроконтроллер STM32F4 27
Глава 2. Разработка структурной и принципиальной схем измерителя скорости течения и направления воды 29
2.1Описание и принцип работы измерителя скорости и направления течения воды 29
2.3 Выбор и обоснование принципиальной схемы 32
2.3.1 Схема излучателя ультразвукового сигнала 32
2.3.2 Вспомогательный источник питания 35
2.3.3 Схема приемника ультразвукового сигнала 38
Схема приемника ультразвукового сигнала предназначена для приема ультразвукового сигнала и преобразования его в цифровой вид для дальнейшей отправки в микроконтроллер. Схема показана на рисунке 2.7. 38
2.3.4 Система управления 40
Рис. 2.8. Принципиальная схема системы управления 41
Глава 3. Функционирование схемы и проведение экспериментов. 43
3.1 Принцип работы по принципиальной схеме. 43
3.2 Генератор импульсов. 44
3.3 Автоматическая подстройка частоты 46
3.4 Проведение лабораторного эксперимента 47
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 50
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. 50
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования. 50
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений 51
4.1.3 SWOT – анализ 52
4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации. 55
4.2 Инициация проекта. 57
4.2.1 Цели и результат проекта. 57
4.2.2 Цели и результат проекта. 58

4.2.3 Цели и результат проекта. 58
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом 59
4.3.1 План проекта 59
4.3.2 Бюджет НИ 62
4.3.2.1 Сырье, материалы, покупные изделия 62
4.3.2.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ 62
4.3.2.3 Основная заработная плата 63
4.3.2.4 Дополнительная заработная плата персонала 64
4.3.2.5 Отчисления на социальные нужды 65
4.3.2.6 Научные и производственные командировки 65
4.3.2.7 Накладные расходы 65
4.3.3 Реестр рисков проекта 66
4.4 Оценка сравнительной эффективности исследования 66
Глава 5. Социальная ответственность 68
5.1 Профессиональная социальная ответственность 68
5.1.1 Электрический ток 69
5.1.2 Термическое травмирование 69
5.1.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений. 70
5.1.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны 71
5.1.5 Умственное перенапряжение. Статические перегрузки. 72
5.1.6 Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования 72
5.1.7 Повышенный уровень ультразвука 74
5.2 Экологическая безопасность 75
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях 75
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. 76
5.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства. 76
5.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 77
Заключение 78
Перечень использованных источников 79
Приложение 1. Схема ультразвукового измерителя 81
Приложение 2. Перечень элементов 82

Введение

XX век – это век прогресса, век стремительного развития в области инновационных технологий. Начало XXI века столь же стремительно. Можно лишь удивляться тому, какое количество действий человека за предыдущий и начавшийся век нашло замену, обладая не в сравнение лучшим быстродействием и простотой. То же коснулось и прибора, проектирование которого является главной задачей данной бакалаврской работы.

При исследовании газообмена углекислого газа и метана в системе "атмосфера-вода" на озере Байкал были получены суточные и сезонные изменчивости потоков этих газов. Дальнейшие исследования направлены на получение пространственной картины распределения растворенных газов в прибрежной акватории озера, а также источников и стоков метана. Особенность методики исследований предполагает наличие одного комплекта газоаналитической и соответствующей пробоподготовительной и регистрирующей аппаратуры [10, 11], однако в таком случае для построения пространственной картины необходимо определять скорость и направление течения.

Измерители скорости течения воды (или измерители скорости потока) – приборы для измерения скорости воды в реках, каналах, водоемах, прибрежных зонах морей и т.п. Спектр разнообразных приложений этих измерителей достаточно широк: от ручных измерений в самых маленьких ручьях - до автономных глубоководных наблюдений за океанскими течениями; моделирующие эксперименты в лабораториях; для определения расхода природных и сточных вод и др. Также возможно интегрирование этих измерителей в качестве датчиков в дистанционные управляемые подводные аппараты (ROV).

Скоростью движения воды называют путь, пройденный частицей жидкости в одну единицу времени. Скорость потока измеряют с помощью гидрометрических вертушек, поплавков, трубок Пито, микровертушек, акустических приборов, электромагнитных приборов и лазерных установок.

Данная работа посвящена разработке ультразвукового измерителя скорости потока воды. Существующие на мировом рынке измерители скорости потока воды, как правило, изготавливаются на заказ, а, учитывая неблагоприятное экономическое положение, стоимость на данные приборы является весьма высокой. Например, цены на измерители, преобразующие частоту вращения винта в скорость потока, то есть электромеханические, начинаются от 80 тыс. рублей. [12] Таким образом, **актуальностью** данной работы является необходимость проектирования точного,

недорогого в производстве прибора для измерения скорости и направления потока воды.

Объектом исследования является фазовый метод обработки УЗ эхо-сигнала, применительно к задачам измерения параметров перемещения водных масс в водоемах с медленными течениями.

Предмет исследования - акустический метод измерения скорости течения воды.

Цель исследований – проектирование и апробация измерителя, а так же оцифровка результатов измерений.

Практическая новизна заключается в использовании пар ультразвуковых датчиков, находящихся на установленном неизменном расстоянии друг от друга.

Практическая значимость работы состоит в использовании спроектированного прибора для исследований в Институте оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН.

Реализация и апробация работы выпускной квалификационной работы обсуждались в ходе доклада по НИР на кафедре ПМЭ в 2015 – 2016 годах.

На защиту выносятся:

–Применимость метода ультразвуковой эхолокации для исследования параметров перемещения водных масс

–Разрешающая способность спроектированного измерителя составляет ХХмм/с вдоль оси излучения-приема

–Экспериментальные результаты апробации акустического метода измерения скорости потока воды на основе спроектированного измерителя.

Структура и краткое содержание работ:

Выпускная квалификационная работа содержит введение, пять глав, заключение, список литературы.

Во введении описывается актуальность работы, формулируется цель и задачи исследования. Отмечена научная новизна и практическая значимость, приведено краткое содержание работ.

Первая глава содержит литературный обзор по теме работы. Описаны существующие методы измерения скорости и направления течения в водоемах. Приводятся наиболее часто используемые методы измерения времени распространения звука и рассмотрены источники ультразвуковых колебаний, в том числе ультразвуковые ПЭП.

Во второй главе описан примененный нами подход измерения,

удовлетворяющий поставленным требования, приведена структурная и принципиальная схема устройства. Представлены схематические решения составных узлов устройства с выбором и расчетом элементной базы, которые применены и испытаны во время макетирования.

Третья глава содержит описание алгоритма работы измерителя по принципиальной схеме, а так же представлены полученные во время отладки экспериментальные данные.

Вчетвертой главе проводится анализ значимости работы, оценка коммерческого и инновационного потенциала разработки, разрабатывается план проекта и расчет бюджета научного исследования, оценивается сравнительная эффективность исследований.

Впятой главе проводится анализ решений по теме работы на предмет возникновения вредных и опасных проявлений факторов производственной среды, предложены средства защиты. При анализе было обнаружено, что прибор не оказывает негативное влияние на окружающую среду. Приводятся меры по предупреждению наиболее типичной чрезвычайной ситуации.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

Глава 1. Обзор литературы

В этой главе рассмотрены различные методы измерения скорости течения и направления воды на примере приборов, уже выпускаемых в массовом или же в частном порядке. Описаны характеристики и области применения. Так же рассмотрены источники ультразвуковых колебаний и, в частности, ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи.

1.1 Методы измерения скорости течения воды

Существует несколько наиболее часто используемых методов измерения скорости и направления течения воды. Отличительными особенностями тех или иных методов обычно являются место применения, точность прибора, а так же наличие дополнительной периферии.

1.1.1 Средства электромеханического измерения

Приборы механического типа на основе крыльчатки (классической гидрометеорологической (гидрометрической) вертушки) основаны на измерении скорости вращения спирального винта в воде. Скорость набегающего водного потока пропорциональна скорости вращения крыльчатки. [8]

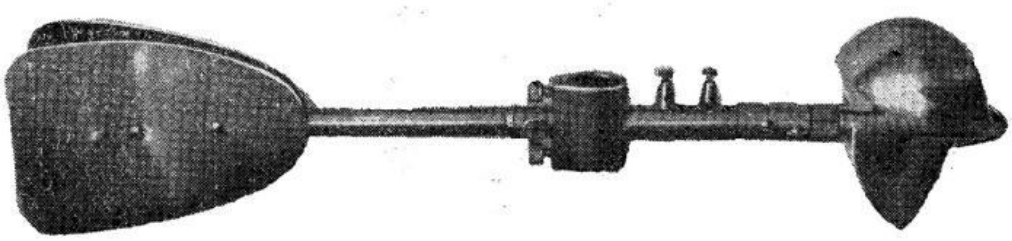


Рис.1.1 - Гидрометрическая вертушка ГР-21М

Работа гидрометрической вертушки основана на преобразовании угловой скорости вращения винта под действием набегающего потока в частоту следования электрических импульсов. Между скоростью течения и числом оборотов лопастного винта в единицу времени существует определенная зависимость, устанавливаемая при тарировке.

Вертушка состоит из корпуса, винта, управляющего контактным преобразователем, и хвостового оперения. Корпус, в котором расположен контактный преобразователь, водонепроницаем и заполнен маслом. Сигнальное устройство состоит из электрического звонка или лампочки, управляемых контактным преобразователем. Один электрический импульс в сигнальной цепи отмечается через 20 оборотов винта. Для счета числа импульсов в единицу времени

используется секундомер. Данный прибор способен измерять скорости в пределах от 0,05 м/с до 2.5 м/с. Вертушка не защищена от ударов и подводной растительности.

Существуют на мировом рынке более качественные ИСТ механического типа, способные в режиме реального времени выводить данные на ПК с последующим сохранением результатов. Примером служит ИСТ Veleport Model 308.

Рис.1.2 – ИСТ Veleport Model 308

Самозаписывающий измеритель скорости течения Model 308 был разработан с использованием проверенных промышленных стандартных датчиков для удовлетворения потребностей океанологов, гидрографов и геодезистов, требующих точного измерителя скорости течения с гибкой конфигурацией и большим объемом памяти. Model 308может выводить данные как непосредственно на ПК, так и может быть использован как в режиме автоматической записи, так и в режиме прямого считывания с помощью кабеля.

Полное управление и настройка Model 308, а также просмотр данных, осуществляется с помощью программного обеспечения DataLog компании Valeport, установленного на ПК, или с помощью *устройства индикации и управления* (CDU) Model 8008.

Model 308 может оснащаться датчиками: скорости потока, направления, температуры, давления и удельной электропроводности. Такие параметры как соленость, скорость звука в воде и плотность являются производными от удельной электропроводности, температуры и давления (параметры CTD) и определяются с помощью специальных уравнений.

Прибор позволяет работать в двух режимах: реального времени и автономном. В режиме реального времени Model 308 подключается к ПК или к устройству индикации и управления Model 8008 с помощью коммуникационного кабеля, позволяющего непрерывно передавать данные в режиме реального времени. В автономном режиме Model 308 запитывается от внутреннего или

внешнего источника питания. При погружении прибора данные записываются во внутреннюю память Model 308. Передавать собранные данные на компьютер можно непосредственно через интерфейс RS232.

Диапазон измерения скорости данного прибора заявлен от 0,03 м/с до 5 м/с. Опционально, Model 308 может быть оснащен датчиком температуры, что позволяет вносить корректировки в измерения. Винт данного измерителя оснащен защитой (рис. 1.2), однако данная защита может спасти лишь от ударов, но не от подводной растительности[].

Вывод:

Можно сделать вывод, что ИСТ механического типа хороши для измерения в двух плоскостях. И это хорошо и даже удобно, если измерение ведется в быстропротекающих реках, каналах или трубах, где вертикальная скорость и проекция скорости на вертикальную ось не так важна, ввиду того, что ей можно пренебречь. Чего не скажешь о водоемах, где скорость течения не превышает иной раз нескольких сантиметров в секунду, а вертикальная составляющая скорости почти не отличается от горизонтальных. Так же, к минусам данного типа относится специфичный форм-фактор, винт данного измерителя может запутаться в подводной тине, ввиду чего либо исказятся измеряемые данные, либо он вовсе перестанет вращаться.

1.1.2 Средства электромагнитного измерения

Измерители электромагнитного типа используют принцип Фарадея для измерения скорости воды. Так как проводник (вода) движется через электромагнитное поле (генерируемое датчиком), он генерирует напряжение, которое измеряется с помощью электродного датчика. Величина создаваемого напряжения пропорциональна значению скорости потока воды.

Для рассмотрения данного метода измерения рассмотрим измеритель фирмы Valeport–ECM.

Рис. 1.3 -ИСТVeleportECM

Измеритель скорости течения MIDAS ECM является универсальным измерителем параметров течения, разработанным для длительной работы и простого развертывания. Архитектура электроники Valeport позволяет подключать множество дополнительных датчиков, а также использовать различные варианты коммуникаций, что делает его одним из немногих мультипараметрических измерителей скорости течения, позволяя работать измерителю как в режиме реального времени с помощью очень длинного кабеля (до нескольких тысяч метров), так и при автономных развертываниях.

Диапазон данного измерителя находится в пределах от 0,001 м/с до 5 м/с

Как и Model 308, ECM может оснащаться множеством датчиков. Сбор информации осуществляется по стандартам RS232, RS485 или, опционально, FSK. Основная разница в максимальной длине кабеля.

Как правило, подобные датчики имеют встроенную память для ведения автономной работы.

Вывод: данные измерители, как правило, не изготавливаются в нашей стране, что делает доступность низкой, а стоимость на данные приборы весьма большой.

1.1.3 Метод акустического измерения

Принцип измерения течения основан на измерении времён прихода и разности фаз двух встречных акустических сигналов, проходящих вдоль потока фиксированное расстояние.

Прибор периодически излучает звуковой сигнал определённой частоты, который принимается пьезоэлектрическим датчиком. Измеряя смещение фазы отражённого сигнала относительно частоты базового сигнала и время его прихода, можно получить оценку скорости течения на определённой глубине. Обычно применяют не один, а четыре излучателя звукового сигнала, что увеличивает точность и позволяет определять направление течения.

К примеру, измеритель скорости течения «ИСТ-1» может использоваться на штанге для глубин до 3 м, на тросе или кабеле для глубин до 25 м. В применениях заменяет гидрометрическую вертушку.

Рис. 1.4 - «ИСТ - 1»

Принцип действия прибора основан на выделении и измерении разности фаз несущих двух встречных акустических сигналов, проходящих вдоль потока. В состав измерителя входят погружной и бортовой блоки, зарядное устройство, соединительные кабели. Погружной блок содержит измерительные каналы, модуль управления, энергопитания и связи. В бортовом блоке содержатся модули управления и индикации, памяти и модемы связи. Прибор может быть подключен к ПЭВМ, при этом возможности управления режимами измерения и обработки данных расширяются. Прибор производит измерения, первичную обработку, представление данных на дисплее, формирование и запись данных для хранения в модуле памяти емкостью не менее 8 Мбит, осуществляет передачу данных в ПЭВМ или канал связи в стандарте интерфейса RS232.

Таблица 1.1 - Параметры и характеристики «ИСТ - 1»

Измеряемый параметр	**Диапазон измерения**	**Случайная погрешность**	**Погреш-ность**
Гидростатическое давление кПа (глубина, м)	0 ÷ 50 (0 ÷ 5) 0 ÷ 250 (0 ÷ 25)	±0,3% ±0,4%	±1,6% (±2%)
Скорость течения, м/с	0,04 ÷ 5,00	±0,04	±5%
Температура воды, °С	-2 ÷ +35	±0,1	±0,6

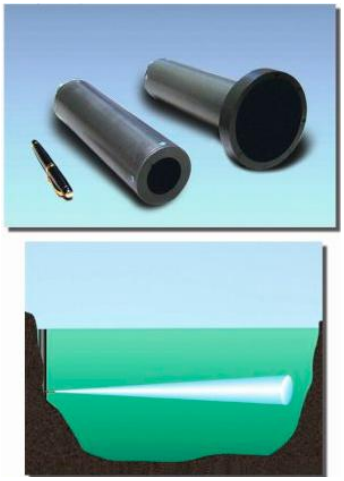


Рис.1.5 - FlowScout 600/2000

FlowScout 600/2000 – линейка приборов для измерения скорости течения воды в реках, каналах и трубах. Он может быть легко установлен на откосах берегов, опорах мостов и внутри труб. Линейка приборов обладает высокой точностью и конкурентоспособной стоимостью, что делает их лучшим выбором для долгосрочных проектов мониторинга скорости водного потока.

Таблица 1.2 - Характеристики и параметры ИСТ FlowScout 600/2000

	FlowScout 600	**FlowScout 2000**
Рабочая частота	600 кГц	2 Мгц
Максимальная дальность	110 м	18 м
Максимальный размер клетки (ячейки)	4м	2 м
Рабочая глубина (стандарт)	100 м	100 м
Максимальная мощность передатчика	25 Ватт	6 Ватт
Точность определения скорости	±0.5% ± 2.0 мм/сек	±0.5% ± 2.0 мм/сек
Размер клетки	От 0.5 до 4 м	От 0.25 до 2 м
Частота посылки импульсов	10/сек	20/сек
Максимальная скорость воды	3.75 м/с	3.75 м/с
Количество клеток	166	86
Материал корпуса	Анодированный алюминий пластик	Анодированный алюминий пластик
Диаметр фланца преобразователя	115 мм	60 мм
Диаметр корпуса	60 мм	60 мм
Полная длина	260 мм	240 мм
Вес в воздухе	1,5 кг	0,93 кг
Вес в воде	0,3 кг	0,2 кг

Вывод: ИСТ-1 практически подходит для поставленной задачи, однако, не имеет возможности жесткого закрепления под водой, сложен в монтировке, так же прибор работает только в двух плоскостях, что нежелательно. FlowScout 600/2000

имеет отличную чувствительность к измерению, однако является прибором, работающим в одном измерении, что делает его идеальным вариантом для каналов и стоков, для быстродвижущейся воды, где направление потока заранее примерно известно. В целом, акустический (ультразвуковой) метод измерения подходит для поставленной задачи. Он не имеет подвижных частей, подверженных запутыванию в подводной тине, имеет хорошую чувствительность и может быть спроектирован в лабораторных условиях.

1.2 Методы измерения времени распространения звука

Скорость звука экспериментально может быть определена различными методами. Среди основных методов можно выделить метод стоячих волн (или метод резонанса), метод фиксации времени прихода сигнала, метод аппроксимации огибающей сигнала и фазовый метод.

Наиболее широко для измерения времени распространения сигнала используется метод фиксации времени прихода сигнала. Для этого используется компаратор, который формирует прямоугольный импульс, передний фронт которого регистрирует момент прихода акустического сигнала. Данный метод можно считать точным, когда амплитуда и форма сигнала остаются неизменными, однако на практике амплитуда сигнала уменьшается за счет потерь в среде, поэтому погрешность измерения времени распространения сигнала в среде остается непостоянной и учесть ее невозможно. При использовании систем АРУ (автоматическая регулировка усиления) можно поддерживать амплитуду постоянной, но при изменении формы сигнала АРУ и компаратор не решают проблему точности определения момента прихода сигнала. [16]

Существенно повысить точность измерений можно с помощью метода двух компараторов с отличающимся порогом срабатывания [20]. Срабатывание первого и второго компараторов происходит в разные моменты времени. Построение прямой по координатам этих точек позволяет найти время начала эхо-импульса и с помощью математических расчетов определить относительную ошибку [15]. Чем круче огибающая переднего фронта, тем меньше ошибка в определении эхо-импульса. С увеличением разницы в установлении порогов компараторов уменьшается ошибка в определении эхо-импульса. Максимальная ошибка получается при срабатывании компараторов в один момент времени.

Метод аппроксимации огибающей сигнала позволяет повысить точность измерений. Способ базируется на аппроксимации нарастающей части огибающей

акустического импульса двумя полиномами второй степени – для положительных и отрицательных экстремумов в разных периодах несущей частоты акустического импульса [16]. В отличие от метода определения момента прихода импульса с помощью компаратора с фиксированным порогом срабатывания, предлагаемый метод теоретически обеспечивает нулевую ошибку при любых линейных вариациях амплитуды сигнала. Данный метод позволил уменьшить погрешность измерения в четыре раза по сравнению с традиционным способом [20].

Для прецизионных измерений скорости ультразвука в режиме бегущей волны большое распространение получил фазовый метод, сущность которого состоит в сравнении фаз двух сигналов: прошедшего через исследуемую среду и опорного [21]. Для реализации фазового метода используются как непрерывные, так и импульсные колебания. Сравнение фаз производится в электрическом тракте. Регистрация разности фаз осуществляется с помощью осциллографа или фазометра.

Одна из модификаций импульсно – фазового метода была использована для измерения дисперсии скорости ультразвука в биологических жидкостях. На рис. 1.6 показана блок – схема установки.

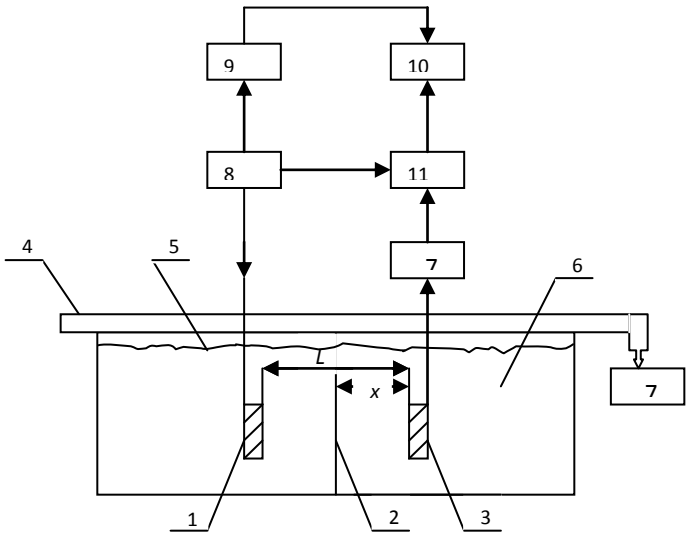


Рис. 1.6. Блок – схема установки для измерения скорости ультразвука в исследуемой жидкости v_S импульснофазовым методом

1 – излучающий пьезопреобразователь; 2 – звукопроницаемая мембрана; 3 – приемный пьезопреобразователь; 4 – подвижный блок с прикрепленными к нему пьезопреобразователями; 5 – эталонная жидкость; 6 – исследуемая жидкость; 7 – устройство для измерения пути, пройденного блоком 4; 8 – генератор

радиоимпульсов; 9 – линия задержки; 10 – осциллограф; 11 – смеситель; 12 – высокочастотный усилитель.

Камера для исследования разделена на две части с помощью проницаемой для ультразвука мембраны. Одна часть камеры заполнена водой, которая не имеет дисперсии скорости в диапазоне 0,1 – 100 МГц, другая часть заполняется исследуемым образцом.

Излучающий 1 и приемный 3 пьезопреобразователи прикреплены к подвижному блоку 4, который может перемещаться горизонтально. Один пьезопреобразователь опущен в воду, выбранную в качестве эталонной жидкости 5, другой в исследуемую жидкость 6. Жидкости разделены звукопроницаемой мембраной 3.

Расстояние, на которое передвинулся блок 4, может быть точно измерено устройством 7. Если скорости ультразвука в воде и исследуемой жидкости различны, возникают фазовые изменения в принимаемом сигнале, когда блок 4 с пьезопреобразователями передвигается горизонтально.

Для того чтобы измерить фазу полученного сигнала, выходной сигнал с приемного преобразователя, усиленный в блоке 12, смешивается в смесителе 11 с опорным сигналом, полученным от генератора 8. На осциллографе 10, запускаемом с генератора 8 через линию задержки 9, наблюдается результат смешения сигналов, который минимален, когда сигналы находятся в противофазе. Фаза полученного сигнала зависит от числа длин волн n_λ, которые разделяют преобразователи: $n_\lambda = \frac{L-x}{\lambda_{H_2O}} + \frac{x}{\lambda_s}$, где L – расстояние между пьезопреобразователями, x – расстояние между приемным пьезопреобразователем 3 и звукопроницаемой мембраной 2, λ_{H_2O} и λ_S – длина волны ультразвука в воде и исследуемой жидкости, соответственно.

Блок 4 с пьезопреобразователями передвигается вдоль оси камеры на расстояние Δx так, чтобы принимаемый сигнал изменил фазу на 2π. Тогда, при $\lambda_S > \lambda_{H_2O}$ число длин волн на пути ультразвукового пучка увеличивается, а при $\lambda_S < \lambda_{H_2O}$ – уменьшается $n_\lambda \pm 1 = \frac{L-x+\Delta x}{\lambda_{H_2O}} + \frac{x-\Delta x}{\lambda_s}$, где знак «+» относится к случаю $\lambda_S > \lambda_{H2O}$, а «-», когда $\lambda_S < \lambda_{H_2O}$.

Если использовать соотношение $v = f \cdot \lambda$, получим: $v_s = v_{H_2O} \dfrac{1}{1 + \dfrac{v_{H_2O}}{f\Delta x}}$.

Величина $f \cdot \Delta x >> v_{H_2O}$. Если исследуемая жидкость имеет дисперсию скорости, величина $f \cdot \Delta x$ будет изменяться с частотой. Таким образом, можно измерить зависимость скорости ультразвука от частоты с исследуемой жидкости.

Поскольку f может быть измерена с высокой точностью, точность метода определяется точностью измерения v_{H_2O}. Основное ограничение метода обусловлено неопределенностью величины v_{H_2O}, табличное значение для воды получено с относительной точностью 10^{-5}.

1.3 Ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлектрические преобразователи — это устройства, использующие пьезоэлектрический эффект в кристаллах, керамике или плёнках и преобразующие механическую энергию в электрическую и наоборот.

Исходя из физического принципа действия пьезоэлектрические преобразователи делятся на три группы [7]:

1. Преобразователи, использующие прямой пьезоэффект (измерение параметров механических процессов);
2. Преобразователи, использующие обратный пьезоэффект (излучатели ультразвука);
3. Преобразователи параметрического типа, использующие прямой и обратный пьезоэффект (пьезоэлектрические резонаторы).

На рисунке 1.7 представлена конструкция преобразователей, наиболее часто встречающаяся для излучения ультразвуковых волн в жидкую или твердую среду. Между демпфером и согласующим слоем находится пьезоэлемент (пьезокерамический диск). На верхней и нижней пластинах диска находятся электроды, которые соединяются с генератором сигналов. Согласно обратному пьезоэлектрическому эффекту, при подаче напряжения на электроды пьезоэлектрического диска будут происходить колебания, которые будут зависеть от частоты сигнала и размера диска [1].

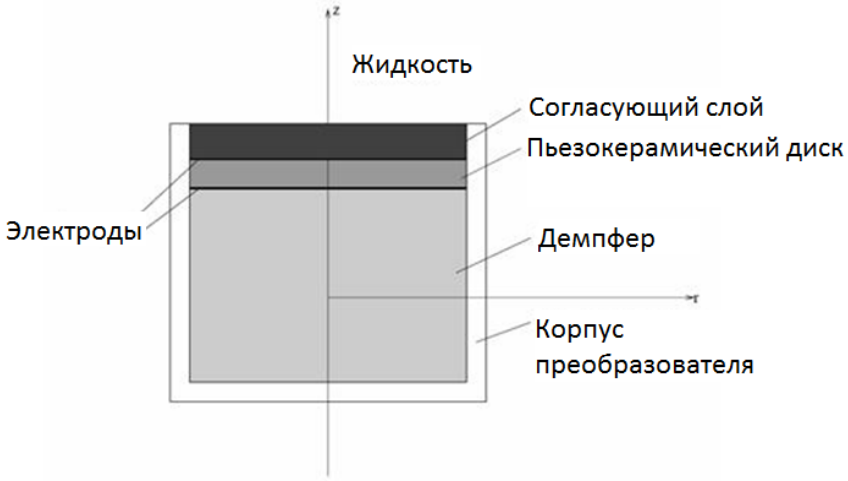


Рис. 1.7 - Конструкция пьезоэлектрического преобразователя

Пьезоэлектрический материал с высоким коэффициентом электромеханической связи имеет большое волновое сопротивление по сравнению с водой. Поэтому, полоса пропускания частотной характеристики диска ниже. Неподходящее волновое сопротивление можно преодолеть, используя демпфер и согласующий слой между пьезоэлектрическим диском и жидкой средой.

Демпфер имеет высокую плотность материала, которая требуется для того чтобы контролировать колебания преобразователя путем поглощения энергии излучаемой пьезоэлементом назад, а так же высокий коэффициент затухания.

Если акустическое сопротивление задней части совпадает с волновым сопротивлением пьезокерамики, то получится преобразователь с широкой полосой частот обеспечиваемой передатчиком, но при этом он может иметь меньшую амплитуду сигнала. В обратном случае, когда акустический импеданс пьезоэлемента и демпфера не совпадает, преобразователь будет иметь меньшее разрешение, но может иметь более высокую амплитуду сигнала и чувствительность.

Основная цель согласующего слоя преобразователя заключается в том, чтобы защитить пьезоэлемент от исследуемого вещества. Согласующий слой должен быть прочным и коррозионностойким к исследуемой жидкости. Дополнительно передний слой должен связывать высокое акустическое сопротивление пьезокерамики с низким акустическим сопротивлением жидкости.

Достоинствами пьезоэлектрического преобразователя является широкие динамические и частотные диапазоны, высокая линейность характеристик, простота конструкции и высокая надежность [1].

1.4 Микроконтроллер STM32F4

Микроконтроллер STM32F4 в данной работе используется в качестве генератора импульсов, а также для измерения времени.

Семейство микроконтроллеров STM32F4 получила широкое распространение за счет ряда преимуществ, которые отсутствуют у других контроллеров [4]:

1. Надежность

Многие современные устройства помимо обеспечения высокой производительности и функциональности, должны удовлетворять особым требованиям обеспечения безопасности. STM32 имеет несколько аппаратных особенностей для поддержания целостности системы. В их число входит детектор падения напряжения питания, система безопасности системы синхронизации и два отдельных сторожевых таймера. Первый сторожевой таймер оконного типа. Он должен обновляться в определенный временной интервал. Если обновление произойдет раньше или позже, сторожевой таймер сработает, т.е. сгенерирует прерывание. Второй сторожевой таймер является независимым, имеет свой собственный внешний осциллятор, отдельный от основной системы синхронизации. Система синхронизации поддерживает функции детектирования неисправностей основного внешнего осциллятора, в случае которых происходит переключение на встроенный 8 МГц RC-осциллятор. Микроконтроллеры семейства STM32F4 выдерживают электростатический импульс, номиналом до 4кВ, в отличие от ATmega8 и MCS-51, у которых величина электростатического импульса составляет до 1кВ. Повышенная устойчивость к электростатическим импульсам позволяет избежать внешних защит. Также микроконтроллеры, семейства STM32F4 обладают высокой устойчивостью к электромагнитным помехам и низкий излучаемый электромагнитный шум.

2. Безопасность

Одним из требований к современным устройствам является обеспечение сохранности программного кода от несанкционированного доступа. Для Flash памяти STM32 может быть установлена защита от чтения через отладочный порт. Когда защита от чтения включена, Flash память также защищена от записи, чтобы предотвратить возможность размещения некорректного кода в таблице векторов прерываний. Микроконтроллеры STM32 также содержат часы реального времени и небольшую область SRAM с питанием от батареи. Содержимое этой области

автоматически стирается по прерыванию от модуля предотвращения вмешательства в устройство.

3. Гибкость работы

Наличие единого адресного пространства для ОЗУ и для флэш-памяти, размером до 1Мб. У микроконтроллера, серии STM32F4 имеет два встроенных тактовых генератора, с частотой работы 16МГц и 32МГц соответственно, следовательно, для большинства приложений отсутствует необходимость во внешнем кварцевом генераторе.

4. Стабильность параметров

Микроконтроллеры, семейства STM32F4, в отличие от микроконтроллеров ATmega8 и MCS-51 обладают высокой стабильностью. Так, например, при повышении температуры или при изменении напряжения питания, характеристики STM32F4 мало меняются. Это связано с тем, что ядро и периферия микроконтроллера работают, на напряжении 1.8В.

5. Расширенные параметры

Микроконтроллеры семейства STM32F4 по многим параметрам имеют расширенные характеристики. Встроенная память ОЗУ достигает размера до 196кБ.

6. Производительность

Микроконтроллеры STM32F4имеют высокую производительность. Это связано с тем, что большинство инструкций микроконтроллера выполняются в одном цикле тактирования. Также ядро STM32F4 включает в себя аппаратные операции умножения, деления и арифметические операции со знаком.

Нельзя не отметить тот факт, что отладочный модуль STM32F4-Discovery (рис.1.8) стоит 1500 рублей, что на порядок ниже, чем STK500 (для ATmega8), которая составляет 3500 рублей.Модуль STM8S-Discovery питается от USB (5В), в отличие от остальных модулей, которым требуется дополнительный блок питания 12В.

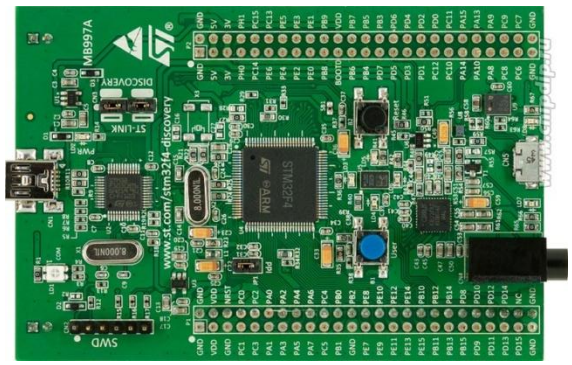


Рис.1.8 -STM32F4Discovery

Глава 2. Разработка структурной и принципиальной схем измерителя скорости течения и направления воды

2.1Описание и принцип работы измерителя скорости и направления течения воды

В качестве метода измерения был выбран ультразвуковой метод измерения скорости течения. Данный метод удовлетворяет всем поставленным задачам, таким как точность, дешевизна установки, а так же сравнительная простота изготовления и отладки.

Данный измеритель представляет собой систему из закрепленных попарно-коаксиально-направленных трех пар ультразвуковых ПЭП, причем расстояние между датчиками каждой пары одинаковое и неизменное (в нашей работе мы использовали регулируемую базу от 0.5 до 2 метров), системы управления, вспомогательного источника, а так же коммутационную плату, стабилизатор напряжения, двухполярный усилитель мощности, усилитель УЗ-сигнала, компаратор и другие элементы.

Прибор закрепляется в необходимом месте под водой. Управление и получение информации о скорости течения осуществляется по линии связи с использованием персонального компьютера.

Принцип работы основан на измерении проекций скорости на каждую из пространственных осей. Анализируя величину каждой проекции можно сделать вывод о величине скорости и направлении течения.

Измерение проекции скорости на одну ось осуществляется в три этапа:

- Измерение времени распространения звука от первого датчика до второго
- Измерение времени распространения звука от второго датчика до первого
- Вычисление проекции скорости, используя уравнение:

$$v = \frac{S}{t_{x1} - t_{x2}},$$

где S – неизменное расстояние между датчиками;

t_{x1} – время распространения УЗ от 1-го датчика до 2-го;

t_{x2} – время распространения УЗ от 2-го датчика до 1-го.

Подробнее об измерении времени описано в третьей главе.

Далее, проецируя все три составляющие на соответствующие оси, получаем величину и направление течения.

На рисунке 2.1 приведено графическое представление получения скорости и направления течения, где

X, Y, Z – оси горизонтальные и вертикальная, соответственно;

M – дополнительная ось, показывающая направление течения;

OM–величина скорости течения;

Ox, Oy, Oz – величины проекция составляющих скорости на соответствующие им оси;

φ – величина угла, между осью Xи дополнительной осью M';

∂ – величина угла, между доп. осью M' и направлением течения M.

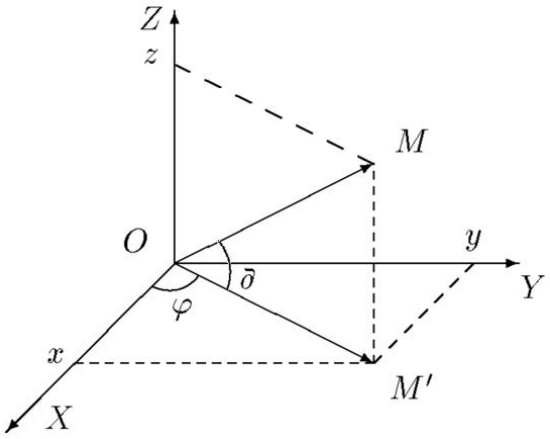


Рис. 2.1 - Графическое представление получения скорости и направления течения

2.2. Выбор и обоснование структурной схемы

Проектируемая система, реализующая описанную выше методику измерения течения в трех измерениях должна содержать три идентичных пары УЗ приемо-передатчика, направленных коаксиально.причем на аппаратном уровне достаточно рассмотреть принципиальную работу одной пары. На структурной схеме (рис 2.2) эти пары пьезоэлектрических преобразователей обозначены как ПЭП 2,4,6. Такое функционирование, когда один и тот же ПЭП выступает сначала в роли излучателя, а затем как приемник, требует соответствующей цепи развязки высокочувствительного усилителя от мощного усилителя импульсных сигналов (на структурной схеме не показаны).

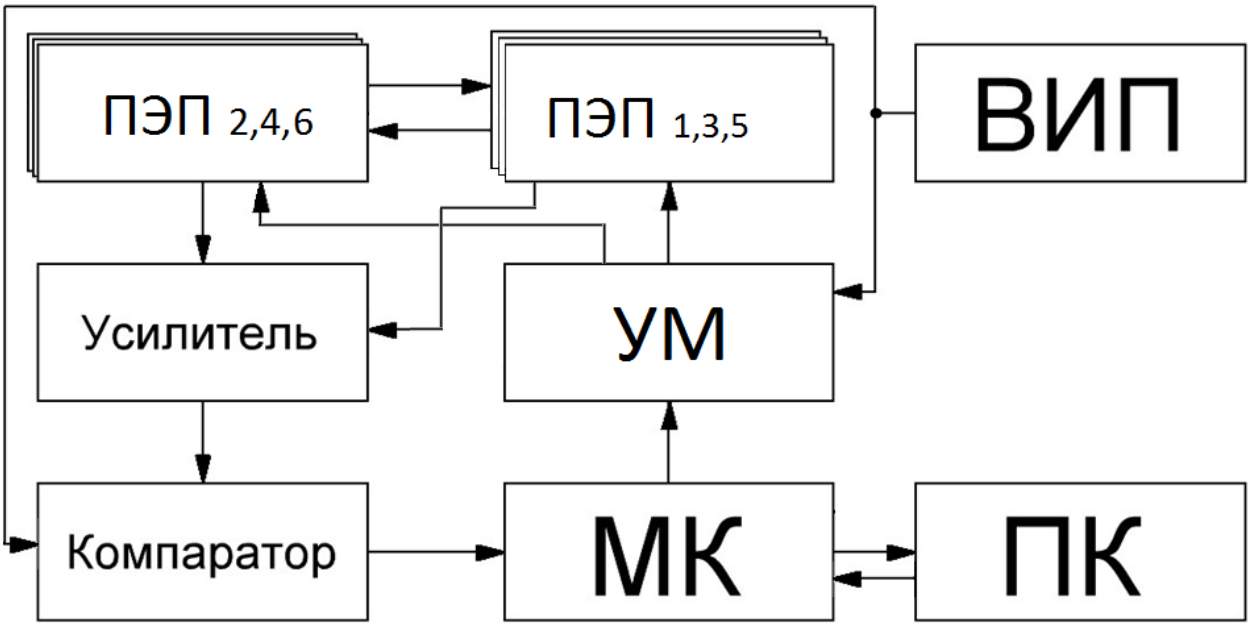


Рис.2.2 - Структурная схема измерителя скорости течения и направления воды

На рис.2.2 представлена структурная схема проектируемого устройства. Далее описано назначение всех ее блоков:

- **УМ** – усилитель мощности. Используется для усиления сигнала на выходе микроконтроллера для раскачки ПЭП.
- **Компаратор** – предназначен для преобразования колебательного сигнала, принятого с ультразвукового датчика в единичный импульс, который в последующем остановит таймер отсчета времени пролета сигнала. Данный способ преобразования используется, чтобы уйти от ошибки, вызванной вариациями амплитуды принятого сигнала. На неинверсный вход компаратора подаем организованное опорное напряжение($U_{оп}$ = 0). Таким образом, входное напряжение, поступающее на инверсный вход устройства, сравнивается с нулевым опорным напряжением в фиксированный отрезок времени. При изменении скорости потока воды, переход колебательного сигнала через 0, засчет неизменной частоты ультразвукового сигнала, будет происходить в разные промежутки времени, при измерении в двух направлениях.
- **Усилитель** сигнала принятого с ПЭП должен иметь высокое входное сопротивление, либо иметь на входе согласующие цепи, поскольку внутреннее сопротивление пьезоэлемента превышает десятки мегаом. Очевидно, что и УМ и усилитель конструктивно лучше располагать в непосредственной близости к ПЭП, чтоб снизить потери и повысить чувствительность и помехоустойчивость данного узла. Сигналы генерации УЗ частот на УМ формируются МК

- **МК** – микроконтроллер. Предназначен для генерации импульсов запуска измерений, регистрации и обработки информации в виде электрических потенциалов. Он же принимает цифровые сигналы поступающие с компараторов, частота и фаза которых затем используется МК для первичной обработки. Благодаря аппаратной фиксации момента прихода сигналов в таймерах МК обеспечивается высокое быстродействие в режиме реального времени. Затем первичные данные с МК поступают в ПК.
- **ПК** – персональный компьютер, на котором происходит дальнейшая обработка принятых с МК данных, а так же их отображение и хранение. Компьютер требуется располагать на расстоянии не более 1200м**.**Передача осуществляется на скорости 9600 бит/с. Объем передаваемых данных зависит от величины проекций скорости течения на три оси.
- **ВИП** – вспомогательный источник питания. Обеспечивает все необходимые напряжения для функционирования блоков структурной схемы. Питание схемы осуществляется по линии питания.
- **ПЭП 1-6**- ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи. При работе на излучение, предназначены для генерации ультразвукового излучения, время пролета которого необходимо зафиксировать. При работе на прием - для детектирования переданного сигнала.

2.3 Выбор и обоснование принципиальной схемы

2.3.1 Схема излучателя ультразвукового сигнала

Данная схема предназначена для преобразования двух цифровых сигналов с микроконтроллера сначала в двухполярный сигнал (на выходе УМ TDA2030) для раскачки ПЭП, а затем излучения ультразвукового сигнала в воду. Схема излучателя ультразвукового сигнала представлена на рисунке 2.3.

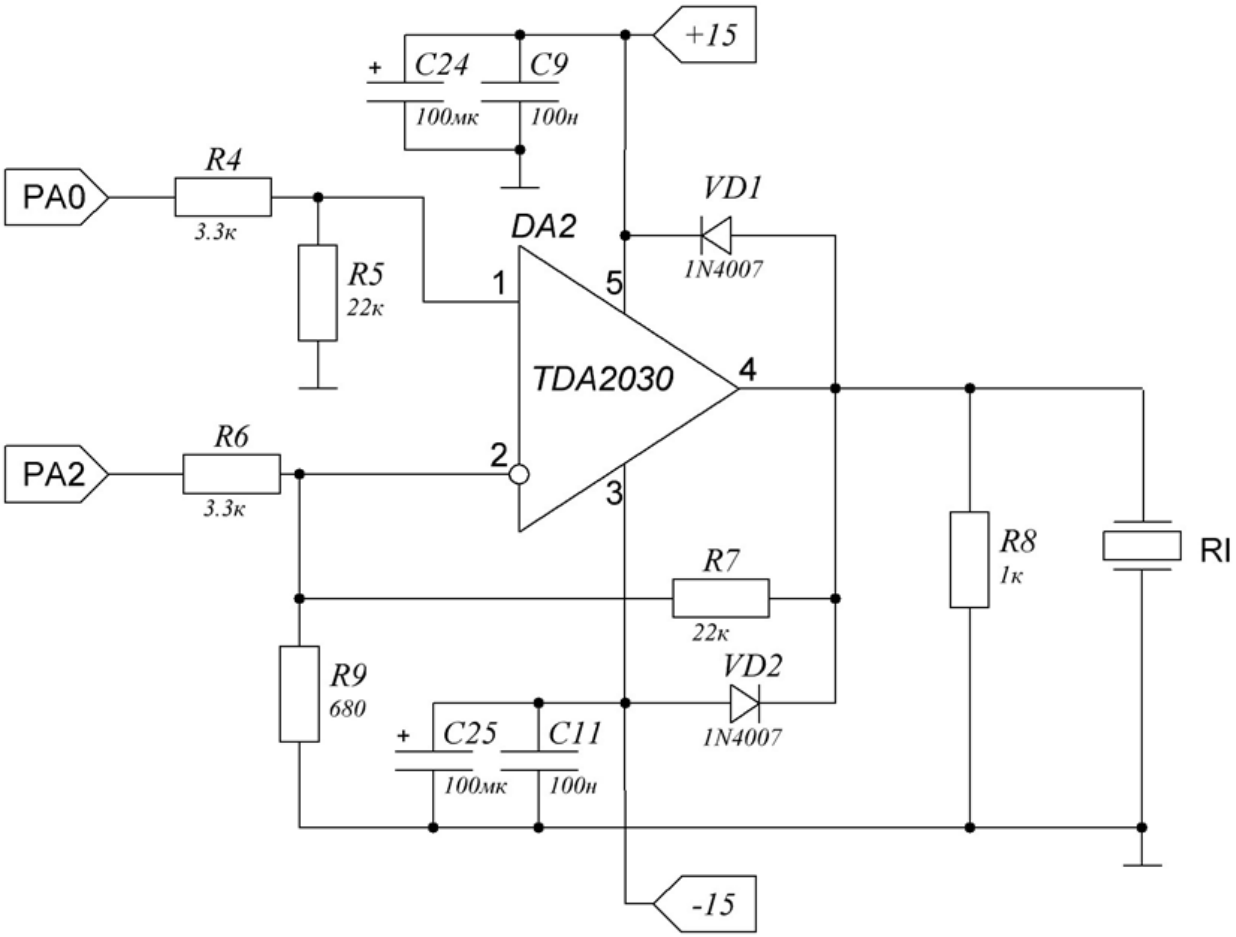


Рис.2.3 - Принципиальная схема излучателя УЗ сигнала

PA0, PA2 – выходы микроконтроллера

В качестве ПЭП будем использовать MA40MF14-5B серии MA40 японской фирмы MurataElectronics. Данные УЗ головки отличаются компактностью и высокой чувствительностью.

В данной схеме используются три пары попарно-коаксиально направленных УЗ головок, поочередно работающих в режиме приемника-передатчика. Таким образом, удается исключить системную составляющую ошибки, вызванную колебаниями плотности воды и при необходимости выделить дополнительные параметры. Очевидно, что используя пару соосных встречно направленных приемника и передатчика, мы будем иметь данные об одной пространственной составляющей скорости течения. Для построения плоскостной или пространственной картины, необходимо дополнить систему аналогичными парами с взаимно перпендикулярными осями, как показано на рисунке 2.4.

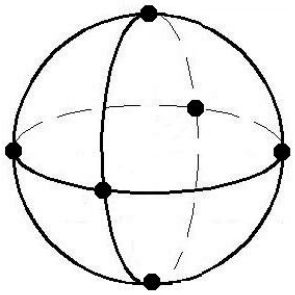


Рис. 2.4 - Размещение ультразвуковых датчиков

Сигнал на выходе микроконтроллера имеет весьма малое напряжение, которого недостаточно для передающей УЗ головки. Для усиления сигнала будем использовать одноканальный HI-FI усилитель мощности класса AB TDA2030A, расположение выводов которого представлено на рисунке 2.5 [5].

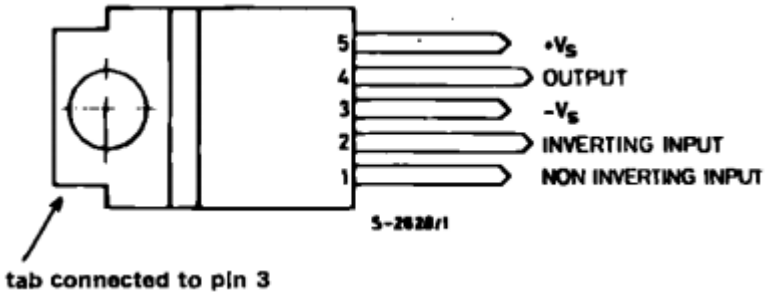


Рис. 2.5 - Расположение выводов TDA2030a

Данная микросхема может быть запитана напряжением от -22 до 22В. TDA2030A широкую полосу частот усиливаемого сигнала, встроенную защиту от короткого замыкания выхода, автоматическую систему ограничения рассеиваемой мощности, удерживающую рабочую точку выходных транзисторов ИМС в безопасной области. Таким образом, на выходе ее получим двуполярный сигнал, амплитудой в 15В.

Конденсаторы C_9,C_{11},C_{24},C_{25} используются для фильтрации помех.

Из справочника [17] выбраны конденсаторы C9,C11,C24,C25,C10:

C_9,C_{11}- CC0805KRX7R8BB104 – керамический SMDконденсатор, рабочее напряжение 25В, номинальная емкость 0,1мкФ.

C_{24},C_{25} - EEEFK1E101XP – электролитический SMDконденсатор, рабочее напряжение 25В, номинальная емкость 100мкФ.

Диоды VD_1 и VD_2 предназначены для защиты прибора от скачков выходного напряжения. $I_{пр}$= (0.5÷1)А; $U_{обр}$>100В, что соответствует требованиям в документации к TDA2030.

Из справочника[14] выбраны диоды VD_3 – VD_6:

1N4007 – выпрямительный диод, максимальное обратное напряжение 1000В максимальный прямой ток 1А.

Коэффициент усиления задан резисторами R7 и R9, которыйнаходится по формуле $K = 1 + \frac{R7}{R9}$.

Из справочника[18] выбраны резисторы:

R_4,R_6 - CR0805-JW-332ELF – SMD резистор, номиналом 3.3кОм, 0.125Вт, корпус 0805.

R_5,R_7 - RC0805JR-0722K – SMD резистор, номиналом 22кОм, 0.25Вт, корпус 1206.

R_8 - CRCW1201KFKEA – SMD резистор, номиналом 1кОм, 0.25Вт, корпус 1206.

R_9 - B54102A1681J60 – SMD резистор, номиналом 680Ом, 0.125Вт, корпус 0805.

Прочие схемы имеют свои недостатки. Например, резонансная схема управления имеет низкие напряжения питания, отчего увеличивается время раскачки излучателя. В трансформаторной схеменужен подбор частоты управляющих сигналов.

2.3.2 Вспомогательный источник питания

Вспомогательный источник питания обеспечивает все необходимые напряжения для функционирования микросхем, таких как усилитель мощности, усилитель сигнала, компаратор. Такой источник питания должен быть стабильным и обеспечивать развязку питания УМ и приемной части.

Принципиальная схема ВИП представлена на рисунке 2.6.

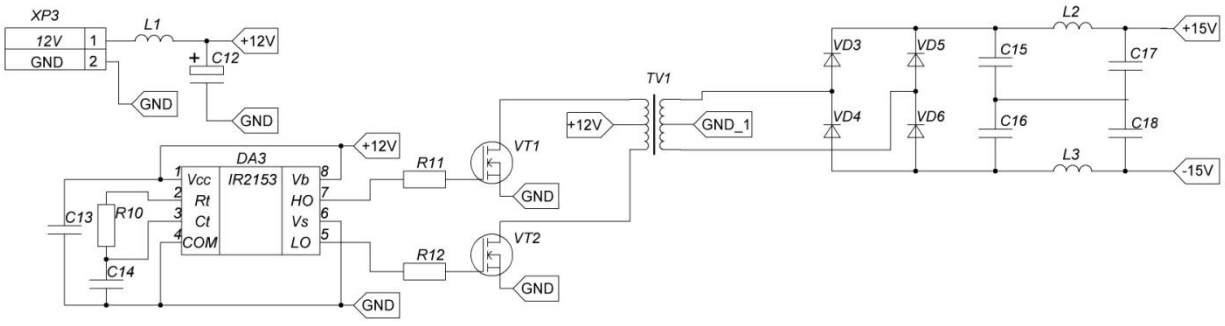


Рис. 2.6 - Принципиальная схема вспомогательного источника питания

Цепь катушки индуктивности L_1 и электролитического конденсатора C_{12}предназначена для защиты схемы от помех внешнего источника питания, подсоединяемого к разъемуXP_3.

Выбраны индуктивность и конденсатор из справочника [17]:

C_{12}: CC0805ZRY5V – керамический SMD конденсатор, номинальная емкость 1мкФ, рабочее напряжение 25 В.

L_1: RLB0914-101KL – катушка индуктивности, номинальная индуктивность 100мкГн, активное сопротивление 0.28Ом, максимальный постоянный ток 1 А, добротность 30.

VD_3 – VD_6 – выпрямитель, собранный по мостовой схеме. Схема преобразует сигнал, поступающий со вторичной обмотки TV_1.

Из справочника выбраны диоды VD_3 – VD_6:

VD_3 – VD_6: SS16 – высокоскоростные диоды Шоттки, максимальный ток 1А, максимальное напряжение на диоде– 60В.

Чтобы исключить высокочастотные помехи, на выходе ВИП использована схема сглаживания сигнала. Это реализовано с помощью цепи, которая состоит из конденсаторов и индуктивностей C_{15}-C_{18}, L_2-L_3.

Для исключения высокочастотных помех на выходе вспомогательного источника питания, необходима схема сглаживания сигнала. Это реализуется с помощью цепи, состоящей из конденсаторов и индуктивностей: C_{15}-C_{18}, L_2-L_3. Примем значения конденсаторов равными 4.7мкФ, катушки индуктивности равными 100мкГн.

Выбраны значения конденсаторов и индуктивностей из справочника [17]:

C_{15} – C_{18}: CC0805ZRY5V – керамический SMD конденсатор, рабочее напряжение 25 В, номинальная емкость 1мкФ.

L_2, L_3: RLB0914-101KL – катушка индуктивности, номинальная индуктивность 100мкГн, активное сопротивление 0.28Ом, максимальный постоянный ток 1 А, добротность 30.

Расчет повышающего трансформатора TV_1:

Мощность на вторичных обмотках:

$P_2=P_{\sum пит\ DA}$,$P_2 \approx 3Вт$

Примем, КПД трансформатора равным 95%, тогда мощность на первичной обмотке вычисляется по формуле:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta};\ P_1 \approx 3.2Вт$$

Напряжение на первичной обмотке 12В:

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1};\ I_1 \approx 300мА$$

Задаем частоту преобразования инвертора 80 кГц.

Рассчитаем трансформатор *TV₁*:

Средняя габаритная мощность трансформатора находится по формуле:

$$P_{ср} = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

$P_{ср}$=3.1Вт

Выберем материал сердечника - феррит 1500НМ3 (B_m=0.35Тл).

$$S_{CT}S_{OK} = \frac{P}{fB_m jK_{OK}K_{CT}};\ S_{CT}S_{OK} = 4.2 * 10^{-10}м^4$$

Возьмем $S_{CT}S_{OK}$больше полученного значения (ввиду удвоенного количества обмоток):

K20x12x6

Из справочника [11] выберем необходимые параметры:

$$(S_{CT}S_{OK} = 0.12см^4;\ S_{CT} = 0.25см^2;\ S_{OK} = 0.785см^2;\ l_{ср} = 2см)$$

Рассчитываем количество витков в первичной обмотке трансформатора:

$$W_1 = \frac{U_1}{B_m K_{CT} S_{CT} f};\ W_1 = 20$$

$$n = \frac{U_2}{U_1};\ n = 1\ ;\ \text{тогда:}$$

$$W_3 = W_2 = nW_1;\ W_3 = W_2 = 20$$

$$S_{пр1} = \frac{I_1}{j};\ S_{пр1} = 0.1мм^2$$

$$S_{пр2} = \frac{I_2}{j};\ S_{пр2} = 0.1мм^2$$

$$S_{пр3} = \frac{I_3}{j};\ S_{пр3} = 0.1мм^2$$

$$K_o = \frac{2S_{пр1}W_1 + 2S_{пр2}W_2 + 2S_{пр3}W_3}{S_{OK}};\ K_o = 0.152 < 0.3$$

Выбираем транзисторы *VT₁* и *VT₂*[14]:

VT₁, *VT₂*: IRFD014 – MOSFET транзисторы, $U_{зи max}$=10 В, $I_{ст max}$=1.7А, $U_{си max}$=60 В, $T_{канала\ max}$=150°С.

R₁₁, *R₁₂* используютсядля ограничения тока управления транзисторов.

Из справочника[18] выбраны резисторы:

R_{11}, R_{12}: CRCW1201KFKEA – SMD резистор, номиналом 1кОм, 0.25Вт, корпус 1206.

Для управления транзисторами используется микросхему IR2153(DA_3), формирующую пару противофазных сигналов с временной задержкой между ними. Это позволяет осуществить управлениеполумостовыми инверторами.

Чтобы обеспечить работы микросхемы IR2153 с частотой 80 кГц (в соответствии с документацией), необходимы:

C_{13}=1нФ, C_{14}=470пФ, R_{10}=20кОм

Из справочника [17] выбраны конденсаторы C_{13}и C_{14}:

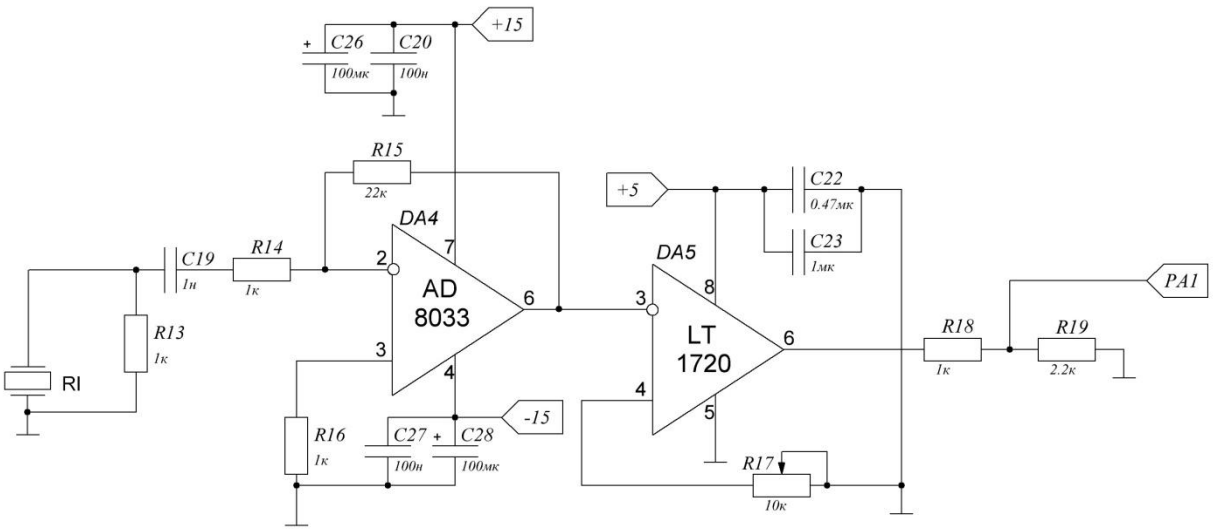
C_{13}, C_{14}: C1206C475K3RACTU –керамический SMD конденсаторемкостью 4.7мкФ, рабочее напряжение 25 В, корпус – 1206.

Из справочника[18] выбираем резистор R_{10}:

R_{10}: CRCW1201KFKEA – SMD резистор номиналом 20 кОм, 0.25Вт, корпус 1206,.

2.3.3 Схема приемника ультразвукового сигнала

Схема приемника ультразвукового сигнала предназначена для приема ультразвукового сигнала и преобразования его в цифровой вид для дальнейшей



отправки в микроконтроллер. Схема показана на рисунке 2.7.

Рис. 2.7 - Принципиальная схема приемника ультразвукового сигнала

Приемная часть содержитультразвуковой ПЭПМА40MF14, операционный усилительAD8033 и компаратор LT1720.

Компаратор LT1720 осуществляет переключение выходного напряжения, когда изменяющийся входной сигнал становится выше или ниже определенного уровня. Компаратор принадлежит к классу формирователей, предназначенных для перехода от аналоговых сигналов к цифровым. Поэтому оконечные каскады компараторов обычно конструируют таким образом, чтобы выходное напряжение соответствовало бы принятым логическим уровням распространенных цифровым микросхем.

LT1720 – это обладающий очень высоким быстродействием компаратор. Он является исключительно универсальным и простым в применении. LT1720 имеет задержку распространения 1.6 нс. Гибкая схема питания позволяет компоненту работать с однополярным напряжением питания до 7 В. Раздельное питание входного и выходного каскадов без ограничений на последовательность включения/отключения обеспечивает широкий диапазон входных сигналов при существенно меньшей потребляемой мощности

Входной каскад компаратора обеспечивает защиту от больших перегрузок по входу, а выходы не имеют эффекта обращения фазы при выходе входного сигнала за пределы допустимого диапазона. Компонент имеет функции фиксации сигнала с коротким временем реакции и программируемого гистерезиса с управлением от одного вывода [3].

Области применения:

- Быстродействующие измерительные приборы
- Восстановление тактового сигнала и данных
- Сдвиг или преобразование логических уровней
- Быстродействующие приемники линий передачи
- Пороговое детектирование
- Пиковые детекторы и детекторы перехода через ноль
- Быстродействующие схемы внешнего запуска
- Широтно-импульсные модуляторы
- Генераторы, управляемые током/напряжением

На выходе компаратора имеем напряжение 5В, что непригодно для входов микроконтроллера. Для понижения напряжения будем использовать обычный резистивный делитель.

$U_{вых}=(U_{вх}*R_{18})/(R_{18}+R_{19})$.

Из справочника[18] выбираем резисторы:

R_{18} - CRCW1201KFKEA – SMD резистор, номиналом 1 кОм, 0.25 Вт, корпус 1206.

R_{19} - B54102A1222J60 – SMD резистор, номиналом 3.3 кОм, 0.25 Вт, корпус 1206.

Конденсаторы C_{22},C_{23} используются для фильтрации от помех, создаваемых источником питания. Из справочника [17] выбираем конденсаторы:

C_{22} - EEEHA1HR47R - электролитический SMD конденсатор, номинальная емкость 0.47 мкФ, рабочее напряжение 50 В.

C_{23} - RPEE41H105M3 - керамический конденсатор, номинальная емкость 1 мкФ, рабочее напряжение 50 В.

AD8033 –ОУ с низким уровнем шума (11 нВ/√Гц) и высоким быстродействием (ширина полосы 80 МГц, скорость нарастания 80 В/мкс), обратной связью по напряжению и входным каскадом на полевых транзисторах. Коэффициент усиления определяется резисторами R15 и R14.

Из справочника[18] выбираем резисторы:

R_{14} -CRCW1201KFKEA – SMD резистор, номиналом 1 кОм, 0.25 Вт, корпус 1206.

R_{15} - RC0805JR-0722K – SMD резистор, номиналом 22 кОм, 0.25 Вт, корпус 1206.

R_{16} - CRCW1201KFKEA – SMD резистор, номиналом 1 кОм, 0.25 Вт, корпус 1206.

Конденсаторы C20,C26,C27,C28 предназначены для фильтрации от помех, создаваемых источником питания. Из справочника[17] выбираем конденсаторы:

C_{20},C_{28}- CC0805KRX7R8BB104 - керамический SMD конденсатор, номинальная емкость 0,1мкФ, рабочее напряжение 25В.

C_{26},C_{27} - EEEFK1E101XP - электролитический SMD конденсатор, номинальная емкость 100мкФ, рабочее напряжение 25В.

2.3.4 Система управления

Система управления предназначена для запуска, оцифровки измерения и отправке их на ПК посредствам UART.

Управляющим элементом схемы является отладочная плата STM32F407Discovery семейства STM32F4. Отладочная плата STM32F407 Discovery выполнена на базе микроконтроллера STM32F407 VG.

Принципиальная схема системы управления представлена на рисунке 2.8.

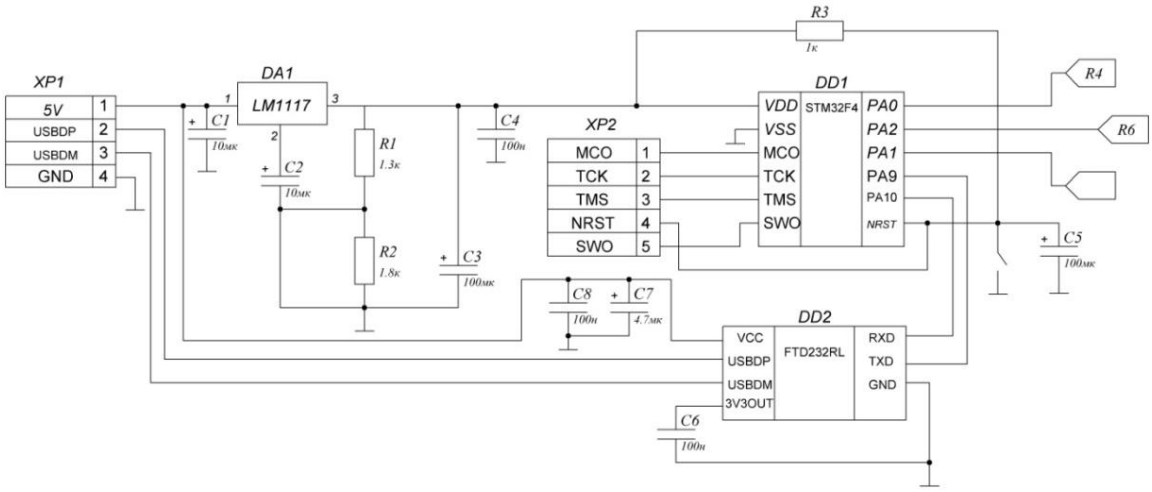


Рис. 2.8. Принципиальная схема системы управления

Главное преимущество данного микроконтроллера – большая тактовая частота. Данная тактовая частота позволит фиксировать изменение скорости перемещения среды с необходимой точностью[4]. Частота работы приведена в таблице 2.1.

Чтобы определить, какой чувствительностью будет обладать будущий ИСТ, необходимо произвести следующие вычисления:

- Рабочая частота микроконтроллера: *F=168 МГц.*
- Скорость звука в воде: $v \approx 1500$ м/с, $F_{TIM} = 168$ МГц.

$$T = \frac{1}{F_{TIM}} = \frac{1}{168 * 10^6} = 5.95 * 10^{-9} = 5.95 \text{ нс}$$

$S = v * T = 1500 * 5.95 * 10^{-9} = 8.93 * 10^{-6} = 8.93$ *мкм.*

Таким образом, будущийИСТ будет «замечать» изменения скорости в 8.93 мкм/с.

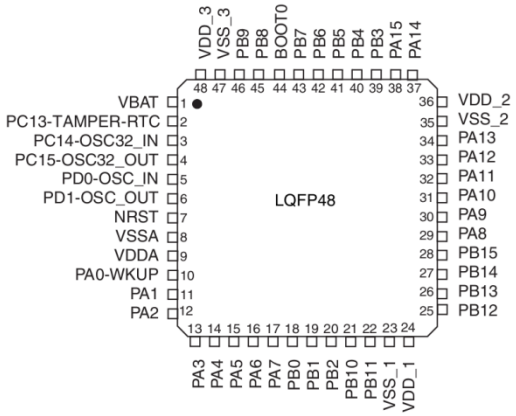


Рис. 2.9 - Принципиальная схема расположения выводов микроконтроллера STM32F407 на микрочипе

Таблица 2.1 - Основные характеристики STM32F4

Ширина шины данных:	32 bit
Максимальная тактовая частота:	168 MHz
Размер программной памяти:	1 MB
Размер ОЗУ данных:	192 kB
Тип ОЗУ данных:	SRAM

Подробный алгоритм работы STM 32F407VG приведен в главе 3.

В схеме присутствует разъем USB (XP_1) для передачи данных и питания микросхем (+5В). Микроконтроллеру STM32F4 требуется питание +3.3В., поэтому в схеме используется линейный стабилизатор напряжения LM1117, выходное напряжение которого регулируется резисторами R_1 и R_2 и находится по формуле $U_{вых} = 1.25 * (1 + \frac{R2}{R1})$. Максимальный ток нагрузки стабилизатора равен 800мА., что является достаточным для STM32F4.

Из справочника [18] выбираем резисторы:

R_1 – CRCW08051K80FKEA - SMD резистор, номиналом 1.8кОм, 0.125Вт, корпус 0805.

R_2 – CRCW08051K30FKEA - SMD резистор, номиналом 1.3кОм, 0.125Вт, корпус 0805.

R_3 –CRCW1201KFKEA – SMD резистор, номиналом 1кОм, 0.25Вт, корпус 1206.

Резистор R_3- токоограничивающий. Конденсатор C_5обеспечивает защиту от дребезга.

Из справочника [17] выбраны конденсаторы:

C_4,C_6,C_8 - CC0805KRX7R8BB104 - керамический SMD конденсатор, номинальная емкость 0,1мкФ, рабочее напряжение 25В.

C_3,C_5 - EEEFK1E101XP - электролитический SMD конденсатор, номинальная емкость 100мкФ, рабочее напряжение 25В.

C_7 - GRM31CR71E475KA88L - керамический SMD конденсатор, номинальная емкость 4.7мкФ, рабочее напряжение 2В.

C_1,C_2 - EEEFC1V100R - электролитический SMD конденсатор, номинальная емкость 10мкФ, рабочее напряжение 35В.

Микроконтроллер программируется через разъем XP_2. Полученные измерения передаются на ПК через UART. Связь устройства с ПК осуществляется с помощью USB, поэтому для передачи данных необходим преобразователь USB-UART. В данной работе был использован преобразователь FTD232RL.

Глава 3. Функционирование схемы и проведение экспериментов.

3.1 Принцип работы по принципиальной схеме.

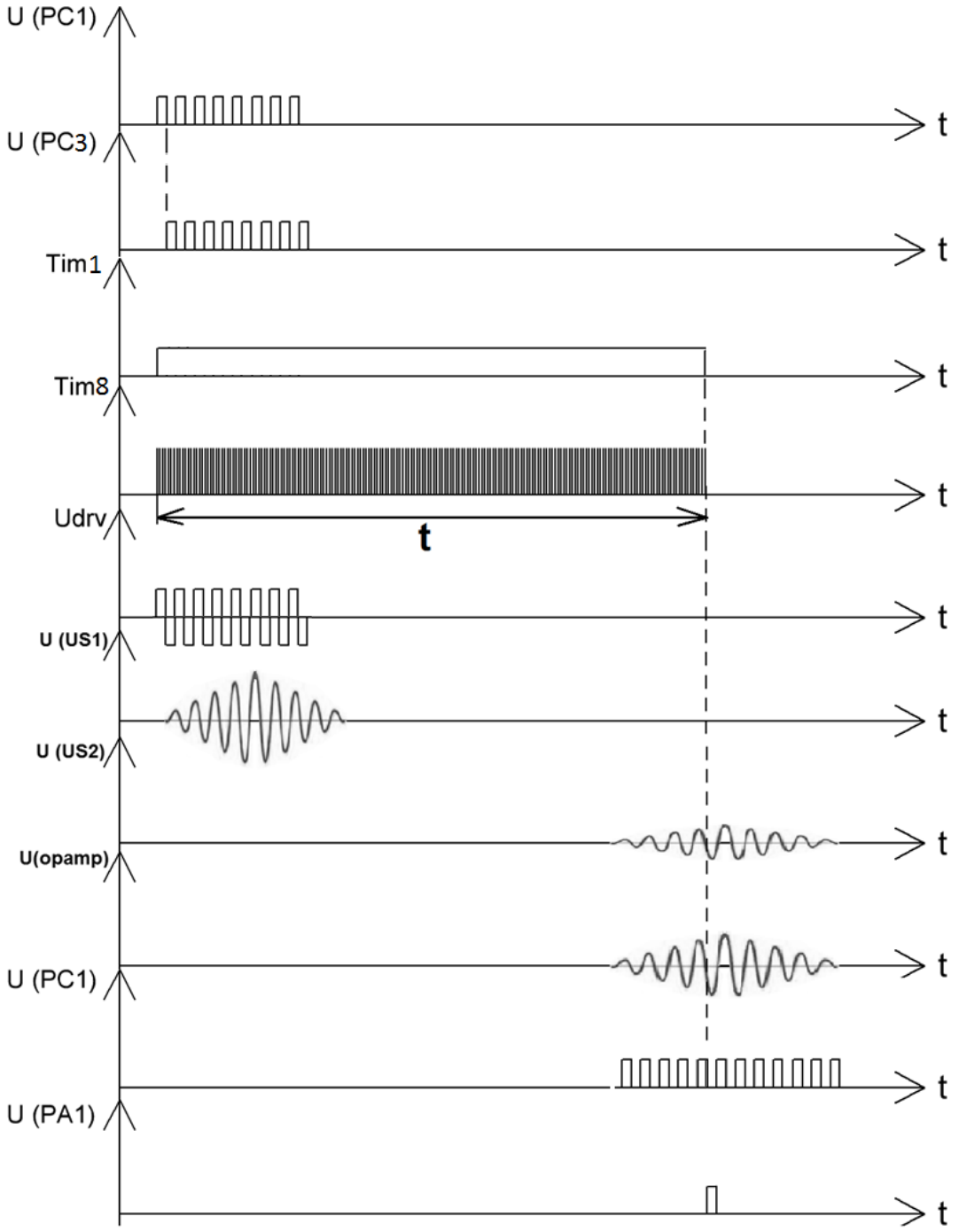


Рис. 3.1 - Осциллограммы, поясняющие принцип работы

Сначала включается таймер TIM1. Затем на выходах PC1, PC3 формируются пачки импульсов, частотой 28 кГц, для того, чтобы «раскачивать» УЗ-передатчик в такт частоты УЗ. На выходе она имеет амплитуду 3,3 В, чего недостаточно для «раскачивания» ультразвукового излучателя таким образом, чтобы находящийся в

метре от него приемник смог уловить различимый сигнал. Для повышения амплитуды пачка импульсов поступает на усилитель TDA2030a, по выходу которого получаем двуполярный сигнал, амплитудой 12В, величина ее амплитуды уже равна напряжению питания усилителя.

Пачка импульсов «раскачивает» излучатель. Спустя промежуток времени, равный длительности пролета ультразвукового сигнала на расстояние 1метр, сигнал приходит на УЗ-приемник. Далее, сигнал поступает на компаратор, фронт с которого «считается» выводом МК-раРА1 тогда, когда создастся прерывание TIM1, то есть тогда, когда пришедший на компаратор сигнал уже имеет различимый вид и большую амплитуду. Компаратор срабатывает при пересечении пришедшим сигналом нулевого значения, для преобразования синусоидального аналогового сигнала в цифровой сигнал, понятный микроконтроллеру. С выхода компаратора, фронт сигнала 5В поступает на резистивный делитель, с которого фронт 3.3В поступает на вход микроконтроллера PA1 по истечению определенного фиксированного времени, относительно начала процесса. Неизменность этого времени и расстояния между датчиками и позволяет судить о скорости, как о результате сравнения двух фаз.

По приходу прерывания на PA1, выключается таймер TIM8, в котором по каждому прерыванию прибавлялась 1 к переменной ***a***.

Далее те же действия происходят в обратном направлении, то есть от US2 к US1.

Путем сравнения времен попарно ***a*** и ***b***, а так же проекции их на оси можно сделать вывод о направлении и величине скорости течения, относительно стоячей воды.

Так же запуск измерения возможен непосредственно из программы Terminal, путем отправки цифры 1.

3.2 Генератор импульсов.

В качестве передатчика в схеме используется ультразвуковой датчик серии MA40. Датчики представленной серии имеют резонансную частоту 40 кГц, следовательно, было необходимо реализовать генератор прямоугольных импульсов 40 кГц на микроконтроллере STM32F4. Программа генерации импульсов реализована на базовом таймере. Алгоритм работы представлен на рис.3.1.

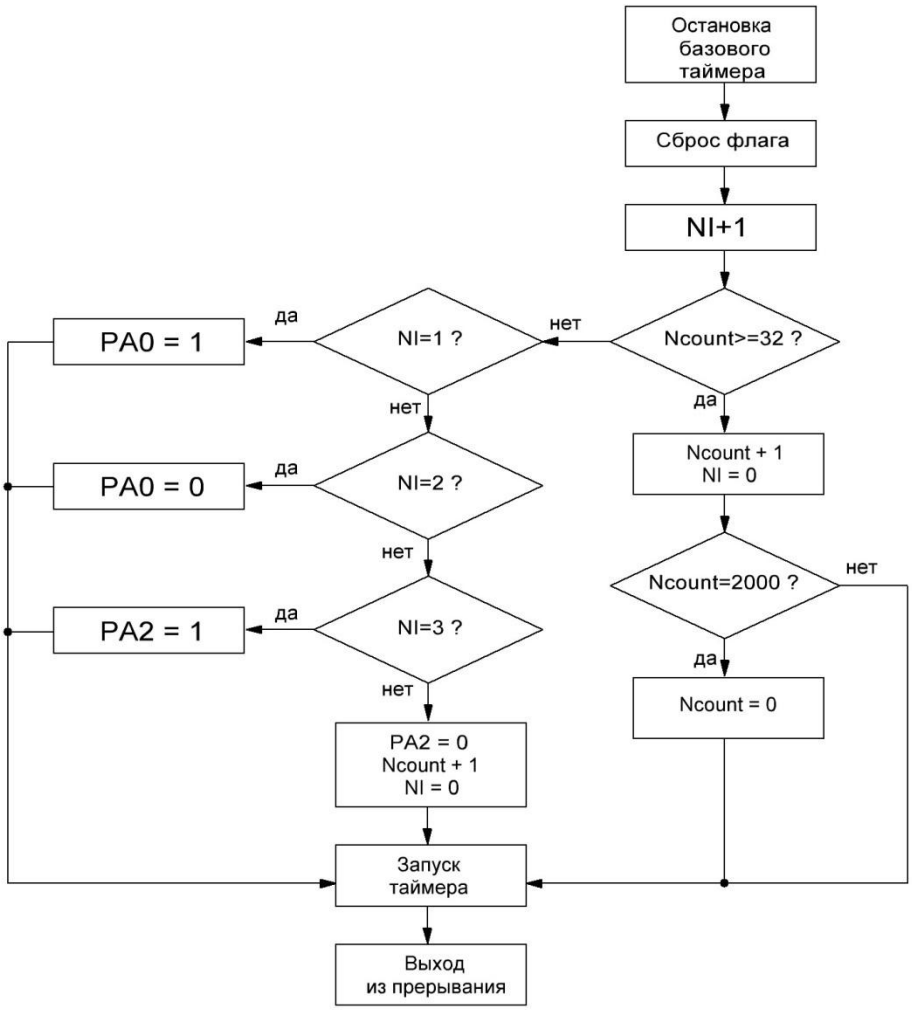


Рис.3.2 - Алгоритм работы генератора импульсов

Переменная NI необходима для задания формы импульса. Всего имеет 4 значения (A0=1, A0=0, A2=1, A2=0). Переменной Ncount задается количество импульсов в пачке, а так же время паузы между пакетами импульсов.

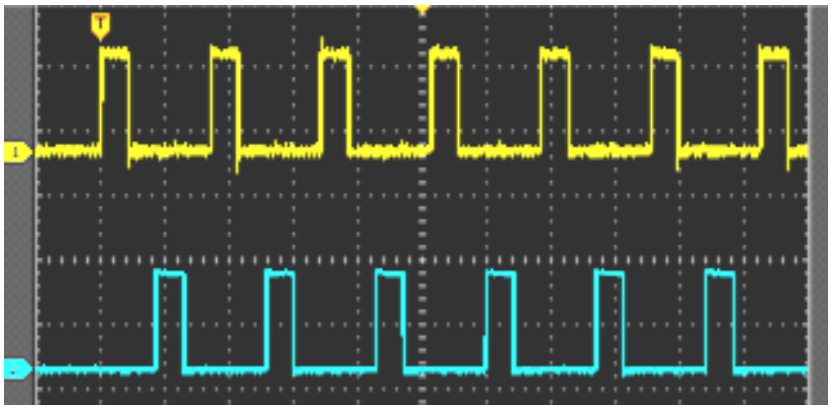


Рис 3.3 - Генерируемые импульсы

3.3 Автоматическая подстройка частоты

В главе 2.1 указано, что прибор располагается на дне водоема. При проведении эксперимента, было выявлено, что из-за давления, оказываемого водой, уходит резонансная частота. Как следствие, уменьшается амплитуда принимаемого сигнала (рис.3.4)

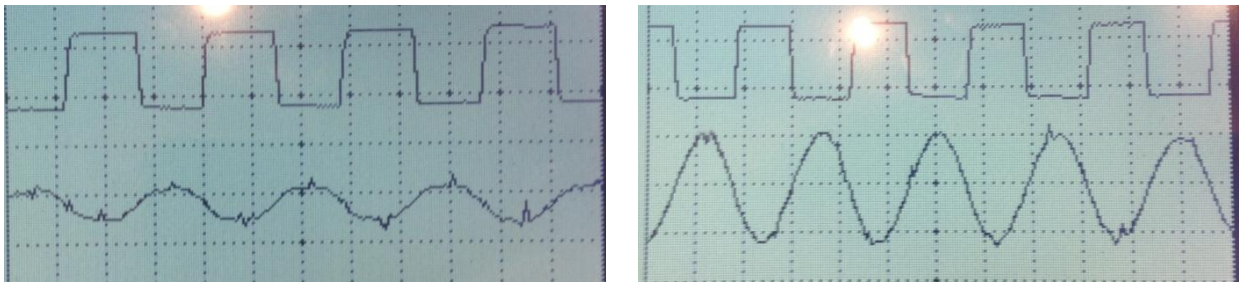


Рис.3.4 - левый – частота колебаний не совпадает с рабочей частотой датчика; правый– частоты совпадают

Решить эту проблему помогает автоматическая подстройка частоты. Алгоритм работы программы представлен на рис.3.4.

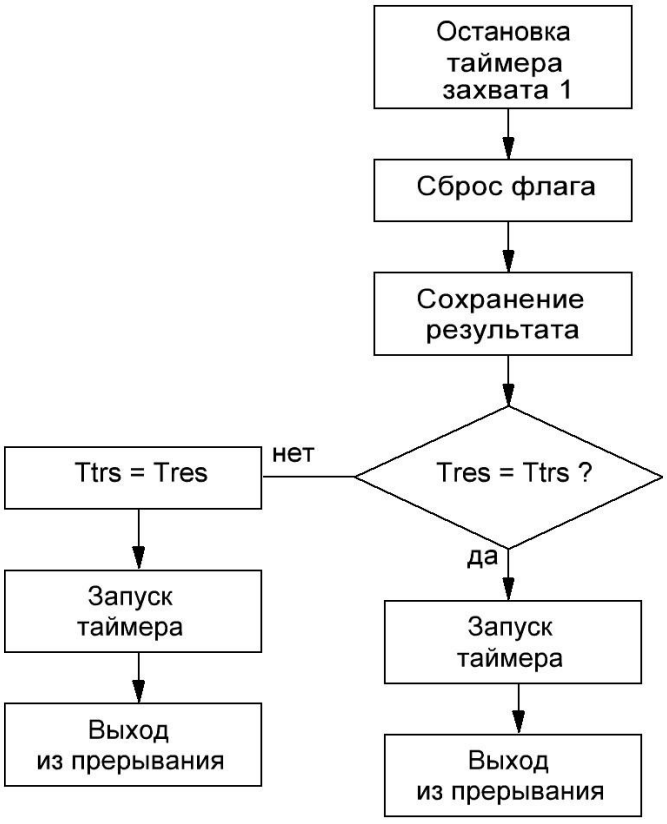


Рис.3.5 -Алгоритм работы программы подстройки частоты

С помощью таймера захвата измеряется период принимаемого импульса и записывается в переменную T_{res}. В случае неравенства периодов излучаемого и принимаемого импульсов, в переменную T_{trs} записывается значение T_{res}. Переменная T_{trs}задает период генерируемых импульсов.

3.4 Проведение лабораторного эксперимента

Ранее описанная схема была собрана и подключена в лабораторных условиях. Работа начинается при включении прибора в сеть.

Процесс начинается с генерации на выходах микроконтроллера испульсов, обеспечивающих частоту 28 кГц, как показано на рисунке 3.6.

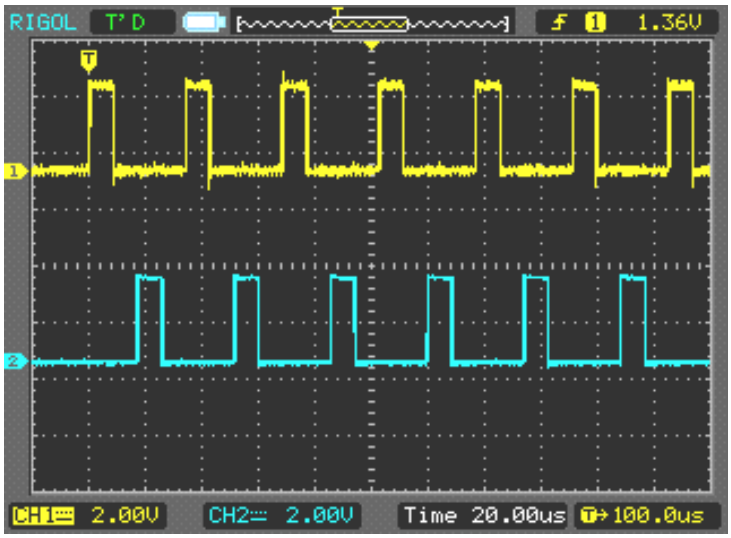


Рис. 3.6 - Диаграммы импульсов, генерируемых микроконтроллером

Далее оба сигнала поступают на инверсный и неинверсный входы усилителя мощности TDA2030, по выходу которого были получены следующий сигнал:

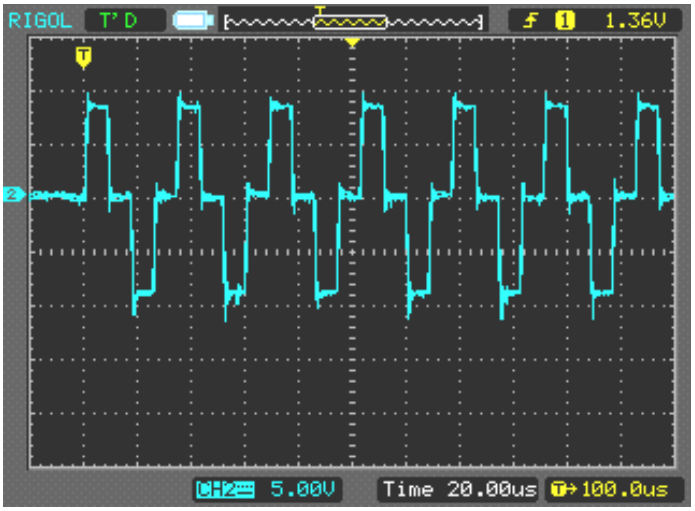


Рис.3.7 - Сигнал на выходе усилителя TDA2030

Данный сигнал имеет ступенчатую форму, что более приближено к синусоидальной форме сигнала, чем обычный меандр.

Затем сигнал поступает на ультразвуковой излучатель. На выходе излучателя был получен сигнал, согласно рис. 3.7.

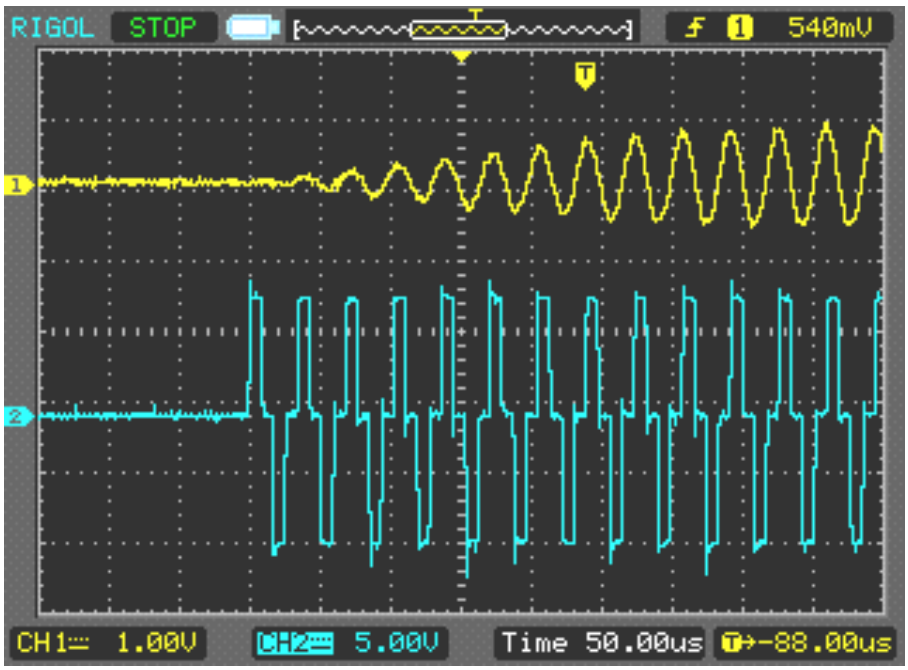
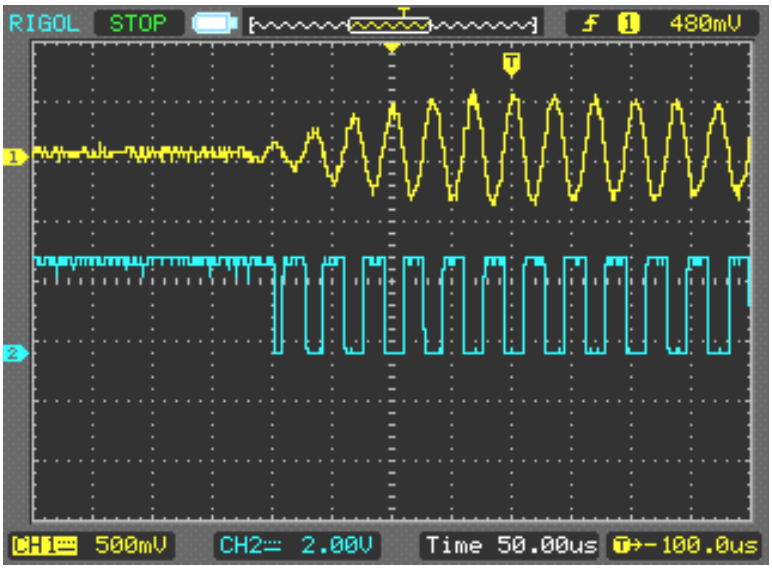


Рис.3.8 - Диаграммы сигналов: 1 канал – с выхода ОУ, 2 канал – с передатчика.

Принятый вторым ультразвуковым датчиком сигнал поступает на операционный усилитель, где усиливается по напряжению, после чего поступает на вход компаратора. На рисунке 3.9 представлен снимок с осциллографа, показывающий сигнал на выходе ОУ и сигнал с выхода компаратора.



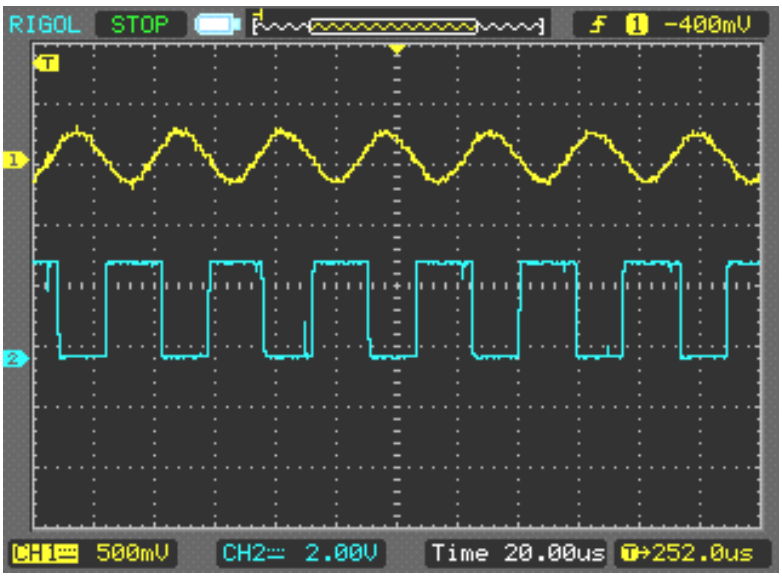


Рис.3.9 - Диаграммы сигналов: 1 канал – с выхода ОУ, 2 канал – с выхода компаратора.

Далее сигнал с выхода компаратора поступает на резистивный делитель, где становится равным 3.3 В. В определенный момент времени вход PA1 микроконтроллера начинает ожидание логической единицы, по приходу которой значение регистра CNT таймера записывается в регистр CCR, а затем в переменную, с которой в дальнейшем будет происходить работа.

Таким образом, осуществляется измерение всех шести времен, каждое из которых помещается в соответствующие переменные. Путем попарного сравнения времен, делается вывод об изменении скорости передачи сигнала в одну сторону, относительно скорости передачи сигнала в другую сторону. Зная разницу во времени и неизменное расстояние между датчиками, находится величина проекций скорости на каждую ось. Все три величины отправляются по UARTу в программу Terminal на ПК. Далее, путем математических вычислений, например занесением в таблицу в программе MathCad с последующим построением пространственного графика, находится величина скорости и направления течения.

Заключение

В качестве выпускной квалификационной работы был разработан измеритель скорости и направления течения в водоемах. Прибор работает на основе фазового метода измерения.

Во второй главе приведен алгоритм программы микроконтроллера, с помощью которого осуществляются измерения, а так же описан принцип работы измерителя. Реализована автоматическая подстройка частоты генерируемых импульсов.

В дальнейшем, планируется проверка в реальных условиях полученной схемы. Так же, планируется оснастить устройство датчиком температуры, в соответствии с которой будет происходить корректировка скорости звука в воде.

При проведении анализа по теме выпускной квалификационной работы на предмет возникновения вредных и опасных проявлений факторов производственной среды, предложены средства защиты. Анализ негативного воздействия на окружающую среду показывает, что существенного влияния не оказывается.

Перечень использованных источников

1. Jan Kocbach. Finite element modeling of ultrasonic piezoelectric transducers.-University of Bergen Department of Physics.:September 2000

2. L7805CVdatasheet – Электрон. дан. - Режим доступа:http://datasheet.octopart.com/L7805CV-STMicroelectronics-datasheet-7264666.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

3. LT1720 datasheet – Электрон. дан. - Режим доступа:http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/17201fc.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

4. STM32F407VGdatasheet – Электрон. дан. - Режим доступа:http://www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577/LN11/PF252140#, свободный. – Загл. с экрана. – яз. англ.

5. TDA2030Adatasheet – Электрон. дан. - Режим доступа:http://www.pdf.datasheetcatalog.com/datasheet_pdf/contek-microelectronics/TDA2030A.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

6. Балбашова Н.В. Миниатюрные импульсные трансформаторы на ферритовых сердечниках. М., «Энерегия», 1976.

7. Богуш Михаил Валерьевич. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / Богуш М.В. ;Панич А.Е. (ред.). — М. :Техносфера, 2014. — 311 с.

8. Измерители скорости течения воды – Электрон.дан. - Режим доступа:http://www.demetra5.kiev.ua/ru/catalog/izmeritely_skorosty_techeniya, свободный. – Загл. с экрана.

9. Отладка STM32F407VG – Электрон.дан. - Режим доступа:http://microsin.net/programming/arm/stm32f407-quick-start.html, свободный. – Загл. с экрана.

10. Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Заворуев В.В., Новицкий А.Л. Экспериментальные исследования процессов газообмена CO2 в системе «атмосфера – водная поверхность» оз. Байкал (постановка эксперимента). // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 05. С. 448-452.

11. Пестунов Д.А., Шмаргунов В.П., Панченко М.В. Измеритель содержания CO2, растворенного в воде // Приборы и техника эксперимента, 2008, №5 С.143-145

12. Приборы гидрологические для измерения и регистрации динамических параметров рек и озёр – Электрон.дан. - Режим доступа:http://xn--80acuzcgdrj.xn--p1ai/catalog/50/, свободный. – Загл. с экрана.

13. С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб, И.С. Мусоров, Д.С. Чертихина. Практическое руководство по программированию stm-микроконтроллеров. -ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. В.Е. ЗУЕВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, 2015. – 119 с.: ил

14. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник/О.Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин. – 2-у изд, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400с.

15. Солдатов А. И. Ультразвуковая аппаратура с волноводным акустическим трактом : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : спец. 05.11.13 / А. И. Солдатов ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; науч. конс. Г. С. Евтушенко. — Томск, 2011. — 40 с. : ил.

16. Солдатов А.И. Определение временного положения акустического импульса методом аппроксимации огибающей сигнала. / Солдатов А.И., Сорокин П.В., Макаров В.С.// Известия Южного федерального университета. – Технические науки, 2009. – № 10. – с. 178-184.

17. Справочник по электрическим конденсаторам / М.Н. Дьяконов, В.И. Карабанов, В.И. Присняков и др.; Под общ. Ред. И.И.Четвертакова и В.Ф. Смирнова. – М.: радио и связь, 1983. – 576с.

18. Справочник по резисторам / В. В. Дубровский, Д. М. Иванов, Н. Я. Пратусевич и др.; Под ред. И. И. Четвертакова и В. М. Терехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 528с.

19. Хмелев В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. — Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. — 203 с.

20. Шульгина, Юлия Викторовна. Повышение точности ультразвуковых измерений методом двух компараторов [Электронный ресурс] / Ю. В. Шульгина, А. И. Солдатов // Известия Южного федерального университета. Технические науки : научно-технический и прикладной журнал. — 2010. — Т. 110, № 9. — [С. 102-106].

21. Zhang D., Gong X.-F., Liu J.-H., Shao L.-Zh., Li X.-R., Zhang Q.-L. The experimental investigation of ultrasonic properties for a sonicated contrast agent and its application in biomedicine // Ultrasound in Med. & Biol. 2000. Vol. 26. № 2, P. 347-351.