

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки: 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Отделение школы (НОЦ): Отделение автоматизации и робототехники

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Автоматизированная система стабилизации летательного устройства самолетного типа по крену</b>

УДК 681.513.1:629.735.3.017.22

#### Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Яушев Рустем Рамильевич		

#### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин М.В.	К.Т.Н.		

#### Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Цавнин А.В.	-		

#### Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Суханов А.В.	К.Х.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Винокурова Г.Ф.	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Громаков Е.И.	К.Т.Н., доцент		
Руководитель ОАР ИШИТР	Леонов С.В.	К.Т.Н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Демонстрировать базовые естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств. Уметь сочетать теорию, практику и методы для решения инженерных задач, и понимать область их применения.
P2	Иметь осведомленность о передовом отечественном и зарубежном опыте в области теории, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств.
P3	Применять полученные знания для определения, формулирования и решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных систем автоматизации технологических процессов и производств с использованием передовых научно-технических знаний и достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие аналитические методы и методы проектирования систем автоматизации технологических процессов и обосновывать экономическую целесообразность решений.
P5	Уметь находить необходимую литературу, базы данных и другие источники информации для автоматизации технологических процессов и производств.
P6	Уметь планировать и проводить эксперимент, интерпретировать данные и их использовать для ведения инновационной инженерной деятельности в области автоматизации технологических процессов и производств.
P7	Уметь выбирать и использовать подходящее программно-техническое оборудование, оснащение и инструменты для решения задач автоматизации технологических процессов и производств.
<b><i>Универсальные компетенции</i></b>	
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально - экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за риски и работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации технологических процессов и производств, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки: 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Отделение школы (НОЦ): Отделение автоматизации и робототехники

Форма представления работы:

бакалаврская работа

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.05.2019	Основная часть	75
15.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
15.05.2019	Социальная ответственность	10

#### СОСТАВИЛ:

##### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин М.В.	К.т.н.		

#### Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Цавнин А.В.	-		

#### СОГЛАСОВАНО:

##### Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Е.И.	К.т.н., доцент		

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки: 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Отделение школы (НОЦ): Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Скороспешкин М.В.  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

### **ЗАДАНИЕ** **на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
8Т5Б	Яушеву Рустему Рамильевичу

Тема работы:

<b>Автоматизированная система стабилизации летательного устройства самолетного типа по крену</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№3489/с от 06.05 .2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Беспилотный летательный аппарат самолетного типа</li> <li>– Техническая документация по микроконтроллеру STM32F303VCT6</li> <li>– Техническая документация по акселерометру LSM303DLHC</li> <li>– Техническая документация по гироскопу L3GD20</li> <li>– Интернет-ресурсы по проектированию и разработке устройств в программах STM32CubeMX и Keil uVision</li> </ul>
---------------------------------	---

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Обзор литературы</li> <li>– Определение передаточной функции между углом отклонения элеронов и углом крена имеющегося беспилотного летательного аппарата самолетного типа, используя математический пакет MATLAB</li> <li>– Фильтрация данных MEMS датчиков</li> <li>– Получение углового положения самолета используя гироскоп и акселерометр</li> <li>– Настройка параметров регулятора в математическом пакете MATLAB</li> <li>– Реализация регулятора на базе микроконтроллера STM32F303VCT6</li> </ul>
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация в формате *.pptx
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Екатерина Валентиновна
Социальная ответственность	Винокурова Галина Федоровна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
–	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель / консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин М.В.	К.Т.Н.		
Ассистент ОАР ИШИТР	Цавнин А.В.	–		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Яушев Рустем Рамильевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8Т5Б	Яушеву Рустему Рамильевичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет – 153 916.7 руб. Затраты на заработную плату – 57 497.7 руб. Затраты на электроэнергию – 346 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию 5,8 кВт/ч
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Налог во внебюджетные фонды 27,1% Районный коэффициент – 1,3 Накладные расходы – 16%

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	Оценка потенциальных потребителей исследования, анализ конкурентных решений, SWOT – анализ.
2. Формирование календарного плана и бюджета инженерного проекта (ИП)	Планирование этапов работ, определение трудоемкости и построение календарного графика, формирование бюджета.
3. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	Оценка сравнительной эффективности исследования. Интегральный показатель ресурсоэффективности – 4.35 Интегральный показатель эффективности – 4.39 Сравнительная эффективность проекта – 1.08

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)**

1. Оценка конкурентоспособности ИР
2. Матрица SWOT
3. График разработки и внедрения ИР
4. Материальные затраты
5. Инвестиционный план. Бюджет ИП
6. Основные показатели эффективности ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	12.03.2019
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Яушев Рустем Рамильевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8Т5Б	Яушеву Рустему Рамильевичу

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Тема ВКР:

**Автоматизированная система стабилизации летательного устройства самолетного типа по крену**

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследовательской работы является система управления угловым положением беспилотного летательного аппарата самолетной схемы, путем изменения угла отклонения элеронов. В состав системы входят: бесколлекторный двигатель, сервоприводы, контроллер, аккумуляторы. Рабочей зоной является зона, включающая рабочий стол, пульт дистанционного управления, ЭВМ. Областью применения разрабатываемой системой является нефтегазовые предприятия, использующие БПЛА для мониторинга нефтегазопроводов.
--	--

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»</li> <li>– ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов	<ul style="list-style-type: none"> <li>– движущиеся твердые объекты (лопасти винта БПЛА);</li> </ul>



2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> <li>– повышенный уровень шума на рабочем месте;</li> <li>– отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– наличие электромагнитных полей радиочастотного диапазона;</li> <li>– повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.</li> </ul>
3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– загрязнение атмосферы объектом исследования не выявлено;</li> <li>– загрязнение гидросферы объектом исследования не выявлено;</li> <li>– выявление загрязнения литосферы объектом исследования: утилизация БПЛА, аккумуляторных батарей и печатных плат.</li> </ul>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– возникновение пожара.</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Винокурова Галина Федоровна	к.т.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Яушев Рустем Рамильевич		

## **Реферат**

Пояснительная записка содержит 98 страниц, 35 рисунков, 22 таблиц, 32 источника и 1 приложение.

Ключевые слова: стабилизация, угол крена, гироскоп, ПИД-регулятор, STM32, управление, удержание.

Целью данной работы является разработка системы стабилизации беспилотного летательного аппарата самолетного типа по крену и проведение летных испытаний полученной системы.

Объектом исследования является разработка управляющего алгоритма на базе микроконтроллера STM32.

Результатом исследования является рабочий прототип системы.

Значимость работы заключается в создании системы, которая будет обеспечивать горизонтальное положение летательного аппарата на протяжении всего полета, тем самым значительно облегчая работу оператора БПЛА на базе доступного микроконтроллера семейства STM32F3.

В будущем планируется дальнейшее развитие системы: реализация системы стабилизации по остальным контурам регулирования, а именно по рысканью и тангажу, а также оптимизация имеющегося кода.

## Содержание

Введение.....	16
1 Проектирование системы стабилизации беспилотного летательного аппарата самолетного типа по крену.....	18
1.1 Управление углом крена.....	18
1.1.1 Конструкция БПЛА.....	18
1.2 Разработка структурной схемы .....	20
1.3 Компоненты системы .....	21
1.3.1 Беспилотный летательный аппарат самолетного типа.....	22
1.3.2 Микроконтроллер STM32F303VCT6 .....	23
1.3.3 MEMS датчики L3GD30 и LSM303DLHC.....	24
1.4 Выбор программного обеспечения .....	25
1.4.1 Keil uVision среда разработок для микроконтроллеров .....	25
1.4.2 Графический генератор проектов STM32CubeMX.....	27
1.5 Используемые интерфейсы передачи данных .....	28
1.5.1 Последовательный интерфейс SPI .....	28
1.5.2 Последовательный интерфейс I <sup>2</sup> C.....	30
1.6 Используемые алгоритмы фильтрации сигналов .....	30
1.6.1 Фильтр скользящего среднего.....	31
1.6.2 Медианный фильтр .....	31
1.6.3 Комплементарный фильтр.....	32
1.7 Заключение по разделу 1.....	34
2 Техническая реализация системы стабилизации беспилотного летательного аппарата самолетного типа по крену .....	35
2.1 Получение угла крена при помощи MEMS датчиков .....	35
2.1.1 Подключение гироскопа L3GD20.....	35
2.1.2 Подключение микросхемы LSM303DLHC.....	42
2.1.3 Объединение показаний двух датчиков .....	46
2.2 Определение передаточной функции между углом отклонения элеронов и углом крена.....	48
2.3 Настройка параметров регулятора в математическом пакете Simulink Matlab.....	51
2.4 Реализация алгоритма дискретного ПИД-регулятора на языке программирования Си.....	52
2.5 Полетные испытания системы .....	55

2.6	Заключение по разделу 2.....	57
3	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	59
3.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	59
3.2	Анализ конкурентных технических решений.....	60
3.3	SWOT-анализ.....	61
3.4	Планирование научно-исследовательских работ .....	63
3.4.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	63
3.4.2	Определение трудоемкости выполнения работ.....	64
3.5	Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	69
3.5.1	Расчет материальных затрат НТИ .....	69
3.5.2	Основная заработная плата исполнителей темы.....	70
3.5.3	Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	72
3.5.4	Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	73
3.5.5	Накладные расходы.....	73
3.5.6	Формирование бюджета затрат НТИ.....	74
3.6	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования..	75
4	Социальная ответственность .....	78
	Введение.....	78
4.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности... 78	
4.1.1	Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	78
4.1.2	Основные эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны исследователя.....	79
4.2	Производственная безопасность .....	80
4.2.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	80
4.2.2	Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего).....	82
4.3	Экологическая безопасность .....	87
4.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	89
	Вывод к главе 4.....	90
	Заключение.....	92
	Conclusion.....	93
	Список используемых источников .....	94
	Приложение А. Код библиотеки, реализующей алгоритм ПИД-регулятора....	98

## Термины и определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**беспилотный летательный аппарат:** Искусственный мобильный объект (летательный аппарат), как правило, многоразового использования, не имеющий на борту экипажа (человека-пилота) и способный самостоятельно целенаправленно перемещаться в воздухе для выполнения различных функций в автономном режиме;

**крен:** Поворот объекта (судна, самолета, фундамента) вокруг его продольной оси;

**микроконтроллер:** Микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами;

**пропорциональный интегральный дифференциальный регулятор:** Устройство, используемое в системах автоматического управления для поддержания заданного значения измеряемого параметра. ПИД- регулятор измеряет отклонение стабилизируемой величины от заданного значения (уставки) и выдаёт управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально этому отклонению, второе пропорционально интегралу отклонения и третье пропорционально производной отклонения;

**стабилизация:** Поддержание заданного постоянного во времени значения одной (или нескольких) регулируемой величины вне зависимости от внешних (по отношению к объекту) и внутренних возмущающих (дестабилизирующих) воздействий, стремящихся отклонить регулируемую величину от заданного значения;

**элероны:** Аэродинамические органы управления, симметрично расположенные на задней кромке консолей, крыла у самолётов нормальной схемы и самолётов схемы «утка»;

**язык Си:** Компилируемый статически типизированный язык программирования общего назначения, разработанный в 1969—1973 годах сотрудником Bell Labs Деннисом Ритчи как развитие языка Би;

**широотно-импульсная модуляция:** Метод преобразования сигнала, при котором изменяется длительность импульса (скважность), а частота остаётся константой [20].

## **Обозначения и сокращения**

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

БПЛА – беспилотный летательный аппарат;

ГОСТ – государственный стандарт;

ДП – диспетчерский пункт;

НИР – научно-исследовательская работа;

НТИ – научно-техническое исследование;

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференцирующий;

ПЛК – программируемый логический контроллер;

ПО – программное обеспечение;

ТЗ – техническое задание;

ТК – трудовой кодекс;

ЧС – чрезвычайная ситуация;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

## **Введение**

Беспилотные летательные аппараты становятся все более востребованными для нужд промышленности, особенно те, что обладают высоким запасом хода. Это связано с тем, что в последние десять лет стоимость приобретения и обслуживания БПЛА значительно снизилась, при одновременном увеличении функционала и времени наработки на отказ.

Практически любая задача, которая раньше решалась при помощи привлечения самолета с экипажем на борту, сегодня может быть решена при помощи дронов. При всем при этом современные БПЛА по сравнению с классическими самолетами не требуют для запуска специальной взлетной полосы, способны работать в автономном режиме, обладают большей маневренностью, являются более экологически безопасными, обладают более низкой стоимостью как обслуживания, так и приобретения. В промышленных предприятиях дроны применяются для мониторинга территориальных владений, таких, как магистральные линии нефтепроводов.

В горизонтальном установившемся полете (без изменения высоты и скорости полета) любое отклонение крена от нейтрального положения приводит к таким нежелательным последствиям, как изменение направления курса полета в сторону крена и снижение высоты полета. Чем больше крен, тем сильнее выражены оба эти явления. Поэтому удержание крена в нулевом положении является важнейшей задачей, напрямую связанной с безопасностью полета, а также с их комфортностью и экономичностью. Полет на самолете без автопилота крена требует от оператора большого опыта пилотирования, а полет в непогоду становится практически невозможным [1].

Целью данной бакалаврской работе является разработка системы стабилизации беспилотного летательного аппарата самолетного типа по крену. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:



- определение передаточной функции между углом отклонения элеронов и углом крена имеющегося беспилотного летательного аппарата самолетного типа, используя математический пакет MATLAB;
- фильтрация данных MEMS датчиков;
- получение углового положения самолета используя гироскоп и акселерометр;
- настройка параметров регулятора в математическом пакете MATLAB;
- реализация регулятора на базе микроконтроллера STM32F303VCT6.

# 1 Проектирование системы стабилизации беспилотного летательного аппарата самолетного типа по крену

## 1.1 Управление углом крена

Для понимания возникающих в полете процессов необходимо ознакомиться с конструкцией используемого беспилотного летательного аппарата.

### 1.1.1 Конструкция БПЛА

Для описания пространственного положения самолета применяется нормальная система координат. Эта система координат представляет собой три взаимоперпендикулярные оси, начало которых совпадает с центром масс БПЛА (рисунок 1) [3].

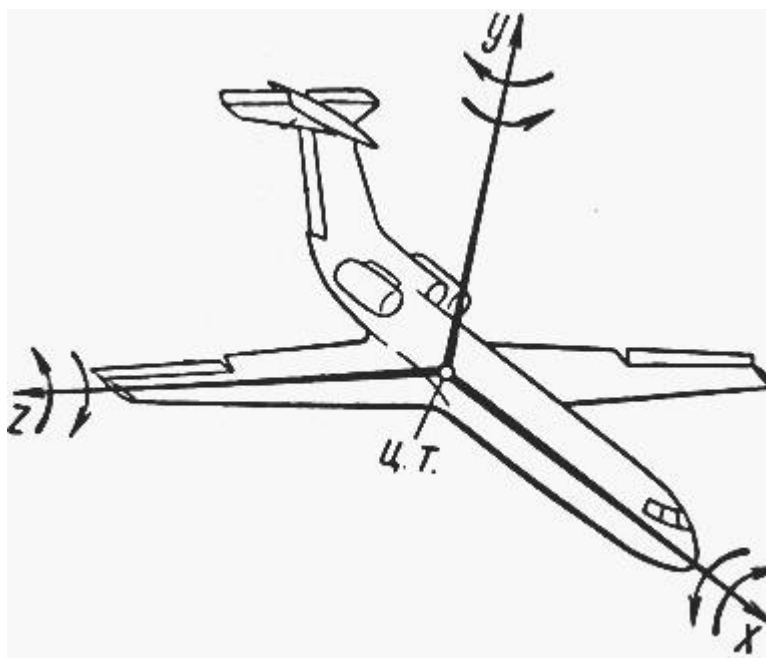


Рисунок 1 – Связанная система координат

Ось  $OY$  всегда направлена вертикально вверх от центра земли, проходя через центр масс летательного аппарата, а оси  $OZ$  и  $OX$  образуют строго горизонтальную плоскость. Для описания положения в пространстве принято использовать углы тангажа, крена и рысканья. Крен является поворотом самолета относительно продольной оси  $OX$ . Тангаж – поворот относительно

поперечной оси OZ. Рыскание – поворот относительно вертикальной оси OY [4].

Дрон представляет собой летательный аппарат с аэродинамическим принципом полета. Двигатель постоянного тока, вращающий лопасти винта, создает набегающий воздушный поток на аэродинамические поверхности БПЛА. Подъемная и управляющие силы образуются за счет обтекания таких несущих поверхностей самолета, как крыло и хвостовое оперение. На рисунке 2 представлена схема используемого в работе самолета.



Рисунок 2 – Устройство самолета

Главной несущей частью самолета является фюзеляж. Он служит креплением для всех остальных конструктивных элементов, таких как: крыло, двигатель, хвостовое оперение, бортовая камера. Внутри фюзеляжа расположены: полетный контроллер, радиоаппаратура управления и литий-ионные аккумуляторы. Корпус самолёта выполнен из пенополистирола, с последующим усилением конструкции при помощи плёночной ленты с клеевым покрытием. Применяемые материалы позволяют создать легкую и при этом достаточно прочную конструкцию.

Как уже было сказано выше, подъемная сила образуется за счет обтекания крыла воздушными массами. Профиль крыла спроектирован так, чтобы разделять набегающий на него воздушный поток. Таким образом образуется два потока расположенных один выше, а другой ниже крыла. Поток над кромкой крыла обладает большей скоростью чем под ним. За счет чего по

уравнению Бернулли образуется область низкого давления сверху и избыточного снизу поверхности крыла. В конечном счете разность этих давлений создает подъемную силу крыла. Аэродинамические свойства крыла зависят от его геометрических размеров таких как размах крыла и его площадь.

На крыле установлены аэродинамические органы управления, называемые элеронами. Отклоняясь дифференциально (т.е. в противоположные стороны), они способны управлять угловой скоростью вращения самолета вокруг продольной оси  $OX$ . Так, например, если на левом полукрыле отклонить элерон вверх, а на правом соответственно вниз, то на левой половине крыла подъемная сила уменьшится, а на правой – увеличится. В результате возникнет момент вокруг продольной оси самолета  $\Delta M_x$ , и самолет наклонится на левое полукрыло (рисунок 3) [5].

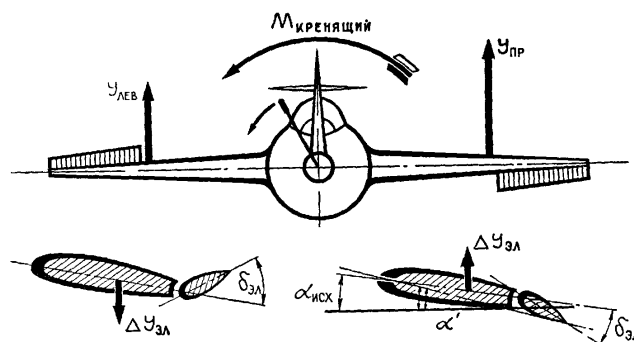


Рисунок 3 – Принцип действия элеронов

Хвостовое оперение состоит из вертикально направленного киля и горизонтального стабилизатора. Киль служит для обеспечения устойчивости самолёта по ходу его движения, а стабилизатор — по углу тангажа [2]. Управление углами тангажа и рысканья осуществляется при помощи расположенных в хвостовой части летательного аппарата рулей высоты и рысканья.

## 1.2 Разработка структурной схемы

Автопилоты крена выполняют стабилизацию вращения БПЛА вокруг продольной оси  $OX$  на траектории его следования, тем самым приводя самолет в горизонтальный полет. Управление креном является одним из наиболее

простых случаев управления вращением центра масс летательного аппарата. Так как при таком движении величина моментов и сил, действующих на самолет на зависит от значения угла крена [6].

Контур стабилизации состоит из вычислительного устройства в виде микроконтроллера, исполнительного устройства – цифровой сервопривод, беспилотного летательного аппарата, гироскопа и акселерометра, расположенных в линии обратной связи регулятора. Регулирование угла крена самолета будет осуществляться по ПИД-закону управления. Структурная схема автопилота представлена на рисунке 4.

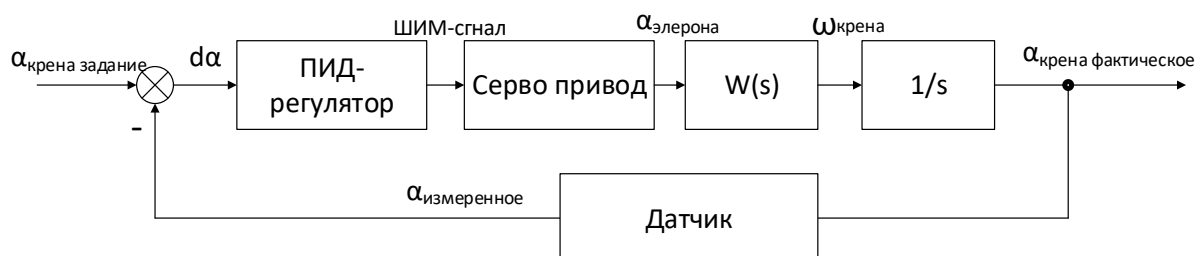


Рисунок 4 – Структурная схема системы стабилизации угла крена ЛА

Принцип работы: угол уставки крена задается один раз при инициализации параметров регулятора и в течении полета не меняется, данные о текущем угле крена получается при помощи показаний гироскопа и акселерометра. Сигнал рассогласования между текущим углом и уставкой поступает на вход ПИД-регулятора, который в свою очередь выдает управляющий сигнал на сервоприводы.

### 1.3 Компоненты системы

После того как была определена структурная схема регулятора необходимо подобрать комплектующие системы. Оборудование выбиралось исходя из его функциональных, и ценовых характеристик. В качестве основного вычислительного устройства был выбран микроконтроллер STM32F303VCT6. В качестве угловых датчиков используется акселерометр LSM303DLHC, а в качестве гироскопа L3GD20 производства компании ST

Microelectronics. Собственно, сам беспилотный самолет был изготовлен собственными силами.

### **1.3.1 Беспилотный летательный аппарат самолетного типа**

Самолет изготавливается собственными силами исходя из имеющихся в наличии материалов. Данный выбор был сделан в первую очередь по причине того, что в ходе летных испытаний работоспособности автопилота и настройки его параметров высокочастотны внештатные ситуации, которые могут привести к крушению воздушного судна.

Крыло самолета было вырезано по трафаретам из пенополистирола фирмы «Пеноплекс». А фюзеляж был выполнен из полового утеплителя, это в свою очередь позволяет очень быстро изготовить новый корпус в случае необходимости. Внутри фюзеляжа расположены два сервопривода для управления рулем высоты и направления, а также расположен вычислительный контроллер. Ниже приведены основные лётно-технические характеристики применяемого самолета:

- длина 1000 мм;
- высота 255 мм;
- размах крыла: 1700 мм;
- хорда крыла: 180 мм;
- площадь крыла: 30,6 дм<sup>2</sup>;
- масса испытуемого самолета: 1000 г;
- мощность силовой установки: 210 Вт;
- тяговая мощность двигателя: 510 г;
- винт: диаметр 229 мм, шаг 114 мм;
- максимальная взлетная масса: 2000 г;
- максимальная скорость вращения двигателя: 15 840 об/мин;
- номинальная скорость вращения двигателя: 9 500 об/мин
- радиус действия радиоаппаратуры управления: 800 м
- напряжение аккумуляторных батарей: 11,1 В;

- емкость аккумуляторной батареи: 2500 мАч;
- максимальное время полета: 15 минут;
- минимальная скорость взлета: 10 м/с.

### 1.3.2 Микроконтроллер STM32F303VCT6

В качестве полетного контроллера используется микроконтроллер STM32F303VCT6, выполненный на базе отладочной платы STM32 Discovery F3. Данный выбор был сделан в первую очередь по причине того, что данное семейство микроконтроллеров оснащается встроенным блоком FPU (Floating Point Unit) для работы с числами с плавающей точкой. Что значительно увеличивает скорость работы с данными типа float или double.

Микроконтроллер построен на базе 32 разрядного RISC ядра Arm Cortex – M4, работающем на частоте 72 МГц. На борту контроллера имеется собственная память (ПЗУ), объемом 256 килобайт, а также 40 килобайт оперативной памяти.

Также немаловажную роль в выборе именно этой платы сыграло наличие на ней двух MEMS-микросхем: трехосевого гироскопа (L3GD20) и акселерометра LSM303DLHC. Малый вес, который составляет 32 грамма, позволяет без проблем разместить плату на борту самолета. Внешний вид платы представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Внешний вид платы

Кроме всего прочего микроконтроллер STM32F303VCT обладает следующими преимуществами:

- рабочие температуры в диапазоне от минус 40 до 80 °C;
- невысокая цена изделия 2500 рублей;
- высокая производительность;
- малое энергопотребление.

### 1.3.3 MEMS датчики L3GD30 и LSM303DLHC

Микросхема L3GD20 – это энергоэффективный трехосевой датчик скорости угловых вращений, выполненный в корпусе LGA-16. Гироскоп обладает следующими характеристиками [8]:

- наличие трех шкал измерения;
- поддержка интерфейсов передачи данных I<sup>2</sup>C и SPI;
- выходная величина в 16 битном формате;
- наличие встроенного низко- и высокочастотного фильтра, с возможностью настройки полосы пропускания;
- напряжение питания в диапазоне от 2,4 В до 3,6 В;
- встроенные режимы низкого энергопотребления и спящий режим;
- диапазон рабочих температур от минус 40 до 85 °C.

В данной работе будет реализовываться подключение гироскопа по интерфейсу SPI, так как оно распаяно на плате STM32 Discovery.

Микросхема LSM303DLHC –представляет собой систему из трехосевого датчика линейных ускорений и трехосевого датчика магнитных полей, выполненных в едином корпусе LGA-14. Для измерения угла крена используется только акселерометр. Он обладает следующими характеристиками [7]:

- измерение ускорения в диапазонах  $\pm 2 \text{ g}$ ;  $\pm 4 \text{ g}$ ;  $\pm 8 \text{ g}$ ;  $\pm 16 \text{ g}$ ;
- выходная величина в 16 битном формате;
- использование последовательного интерфейса I<sup>2</sup>C;
- наличие энергосберегающего режима работы;
- наличие встроенного датчика температуры;
- напряжение питания в диапазоне от 2,16 до 3,6 В;



- датчик может быть настроен на генерацию прерывания от движения устройства;
- диапазон рабочих температур от минус 40 до 85°C.

## **1.4 Выбор программного обеспечения**

Программирование и настройка выбранного оборудования осуществляется с использованием следующего программного обеспечения:

- Keil  $\mu$ Vision 5 – данная среда используется для программирования микроконтроллера через встроенный программатор ST link v2.
- STM32CubeMX – данное программное обеспечение применяется для конфигурации микроконтроллера, автоматически генерируя необходимые файлы для проекта Keil.

### **1.4.1 Keil $\mu$ Vision среда разработок для микроконтроллеров**

Keil  $\mu$ Vision – это интегрированная среда разработки, представляющая собой полный комплекс программного обеспечения необходимый для программирования и отладки микроконтроллеров серии STM32 [10].

Keil  $\mu$ Vision позволяет работать с проектами высокой степени сложности, позволяя как вносить изменения в исходный текст, так и выполнять внутрисхемную отладку программы и программировать ПЗУ микроконтроллера. Скрытие большей части второстепенных функций от разработчика позволяет значительно разгрузить интерфейс и сделать его интуитивным. Однако при необходимости решения сложных задач можно задействовать весь потенциал модулей, работающих под единой оболочкой. Ниже представлены основные программные средства Keil  $\mu$ Vision [9]:

- встроенная база данных микроконтроллеров с содержанием информации обо всех поддерживаемых устройствах. Она хранит ссылки на источники информации и данные конфигураций. При добавлении нового устройства в поле «Project Target» все его опции добавляются автоматически.

- Менеджер проектов, который служит для объединения отдельных исходных и заголовочных файлов в группы, обрабатываемые по единым правилам. Такая группировка позволяет легче ориентироваться среди множества файлов.
- Встроенный редактор кода облегчает процедуру набора исходного текста, за счет выделения синтаксических ошибок цветом. Также редактирование остается доступным в режиме отладки кода, позволяя выделять или сразу исправлять проблемные участки кода.
- Средства автоматической компиляции, ассемблирования и компоновки, которые служат для создания загрузочного модуля программы.
- Отладчик-симулятор, предназначенный для отладки скомпилированной программы на виртуальной модели микроконтроллера. Моделирование работы ядра осуществляется на достаточно высоком уровне достоверности.

Снимок экрана программы представлен на рисунке 6.

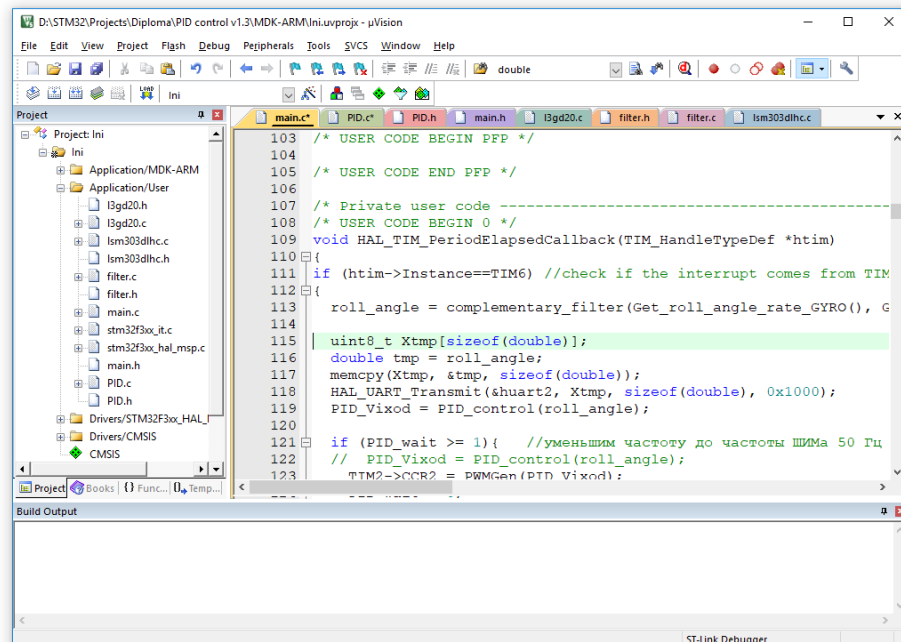


Рисунок 6 – Снимок экрана Keil  $\mu$ Vision

### 1.4.2 Графический генератор проектов STM32CubeMX

STM32CubeMX – это графический инструмент, который позволяет осуществлять конфигурацию микроконтроллеров и микропроцессоров серии STM32, а также генерировать соответствующий Си код для ядра Arm® Cortex®-M [12].

Визуальный редактор является составной частью инфраструктуры STM32Cube, которая содержит специальные библиотеки для обеспечения работоспособности с различными линейками микроконтроллеров STM32. Устанавливать необходимые библиотеки можно непосредственно в редакторе через встроенный загрузчик, при этом компьютер должен быть подключен к сети интернет. Также имеется возможность отслеживания актуальных версий библиотек, уже установленных на компьютер.

Пакет программного обеспечения STM32CubeMX включает в себя следующие основные компоненты:

- библиотеку CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard). Представляющую собой независимый от вендора уровень абстракции для серии процессорных ядер Cortex®-M, определяющий интерфейсы для ядра и его периферию;
- библиотеку HAL (Hardware Abstraction Layer). Представляющую собой библиотеку для работы с периферийным оборудованием. Она позволяет избавиться от работы непосредственно с регистрами микроконтроллера, а работать напрямую с необходимыми объектами. Таким образом код, написанный с использованием библиотеки HAL, может быть легко переписан для использования на другом микроконтроллере. Именно с помощью этой библиотеки была написана основная управляющая программа;
- библиотеки поддерживающие популярные платы, такие как STM32 discovery;
- библиотеки более высокого прикладного уровня, реализовывающие поддержку файловой системы FAT, протоколы передачи

данных TCP/IP, операционных систем реального времени (FreeRTOS), интерфейса USB.

Основные задачи, которые могут быть решены с использованием данного ПО представлены ниже:

- настройка тактирования, портов, таймеров. Также возможен выбор способа тактирования микроконтроллера;
- настройка режимов работы портов;
- настройка режимов работы таймеров;
- расчет потребления энергии.

Снимок рабочего экрана программы представлен на рисунке 7.

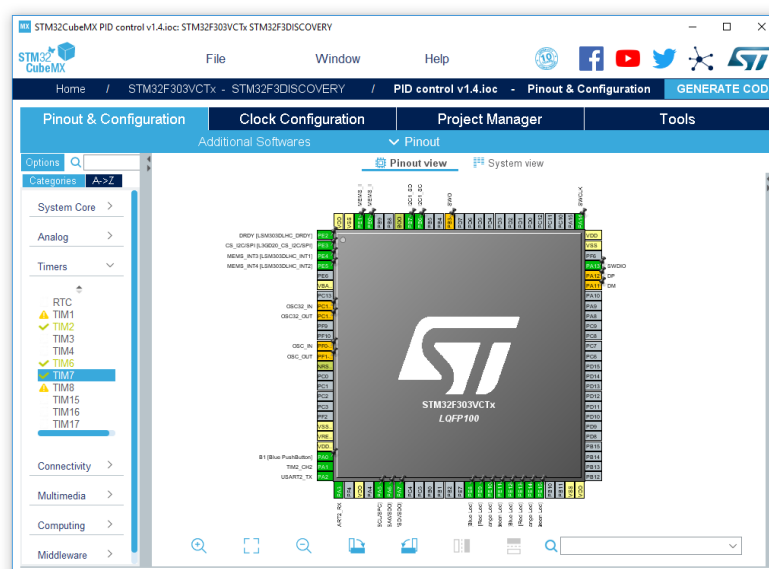


Рисунок 7 – Снимок экрана программы STM32CubeMX

## 1.5 Используемые интерфейсы передачи данных

Подключение гироскопа L3GD20 осуществляется посредством последовательного интерфейса SPI, а микросхема LSM303DLHC посредством I<sup>2</sup>C.

### 1.5.1 Последовательный интерфейс SPI

Serial Peripheral Interface (spi) – представляет собой интерфейс для последовательного обмена данными между микроконтроллером и

периферией. В SPI имеется одно ведущее устройство, одно или несколько ведомых. Для передачи данных используются 3 линии [13]:

- MISO (Master Input Slave Output) – по этой линии осуществляется передача данных от ведомого (Slave) устройства к ведущему (Master).
- MOSI (Master Output Slave Input) – по этой линии ведущее устройство (Master) отправляет данные ведомому (Slave).
- SCK (Serial Clock) – данная линия служит для передачи тактирующего сигнала ведомому устройству.
- Также при наличии нескольких Slave устройств на шине необходимо использовать линию SS (Slave Select), позволяющую выбрать ведомое устройство.

Протокол записи и чтения датчика угловых скоростей L3GD20 представлен на рисунке 8 [8].

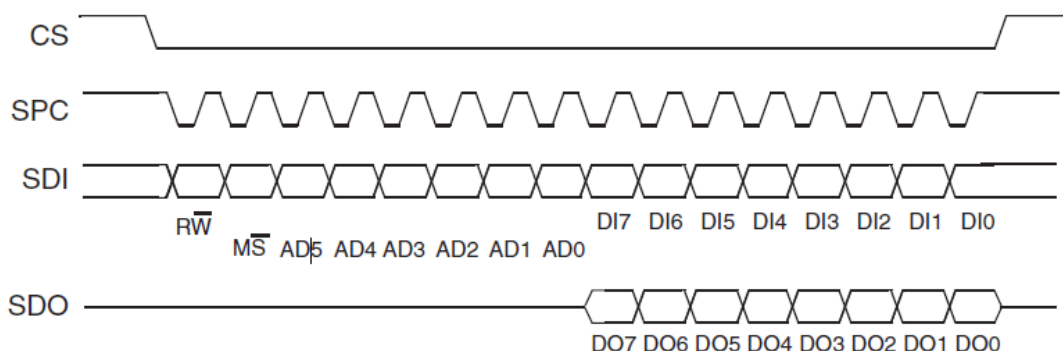


Рисунок 8 – Протокол записи и чтения

В данном случае реализовано четырех проводное подключение: CS, SPC, SDI, SDO. CS – это линия выбора Slave устройства, при передаче данных необходимо чтобы на линии был сигнал соответствующий логическому нулю. По линии SPC осуществляется тактирование. А линии SDI и SDO служат для приема и передачи данных соответственно.

### 1.5.2 Последовательный интерфейс I<sup>2</sup>C

Inter-Integrated Circuits (I<sup>2</sup>C) – последовательный протокол обмена данными, использующий для передачи данных две двунаправленные линии связи [14].

В сети может быть несколько ведущих (Master) устройств, которые генерирует тактирующий сигнал и инициализируют передачу данных. Также в сети может быть несколько ведомых (Slave) устройств, обладающих каждый своим уникальным адресом. К одной шине может быть подключено до 127 устройств. На рисунке 9 представлено подключение устройств к шине [14].

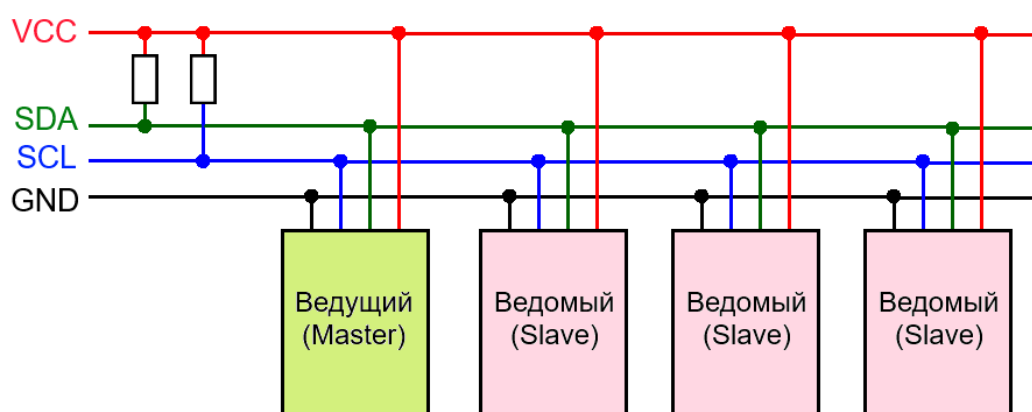


Рисунок 9 – Подключение устройств к шине

Передача данных инициализируется ведущим устройством. Для этого он должен начать передавать тактирующие импульсы по линии SCL. Одновременно по линии SDA высылается адрес устройства, к которому выполняется обращение, состоящее из 7 бит. Далее по этой же линии высылается код операции (запись или чтение) и еще один бит, называемый битом подтверждения, сигнализирующий о том, что ведомое устройство приняло запрос. В случае отсутствия бита подтверждения ведущее устройство прекращает выполнение запроса. После установления связи осуществляется чтение или запись.

### 1.6 Используемые алгоритмы фильтрации сигналов

В процессе снятия сигналов MEMC-датчиков полученная выходная величина получается сильно зашумленной. Для извлечения полезного сигнала

из зашумленного исходного необходимо произвести его фильтрацию. В работе используется фильтр скользящего среднего, медианный фильтр и комплементарный фильтр.

### 1.6.1 Фильтр скользящего среднего

Фильтр скользящего среднего — фильтр, значение которого в каждой точке равняется среднему арифметическому за определенный промежуток времени до текущего значения. Скользящие средние часто используется для устранения колебаний относительно полезного сигнала, позволяя выявить тенденции или циклы. Значение фильтра в на  $n$ -ом шаге рассчитывается по формуле (1).

$$Y[n] = \frac{\sum_{i=n-N+1}^n X[i]}{N}, \quad (1)$$

где  $X[i]$  — зашумленный сигнал на  $i$ -ом такте работы;

$Y[n]$  — отфильтрованный сигнал на  $n$ -ом такте;

$N$  — настроенный параметр.

По формуле (1) видно, что на отфильтрованное значение влияют только  $N$  предыдущих измерений, то есть данный фильтр обладает конечной импульсной характеристикой. Этот фильтр прост в реализации, не требует больших вычислительных ресурсов микроконтроллера, его можно легко настроить, но при всем при этом при большом сглаживании  $N$  имеет большую задержку относительно фильтруемого сигнала. Кроме того, этот тип фильтра плохо подходит для фильтрации импульсной помехи.

### 1.6.2 Медианный фильтр

Медианный фильтр — один из видов цифровых фильтров. Данный фильтр получил широкое распространение в цифровой обработке сигналов для уменьшения уровня шумов. Он также способен с высокой эффективностью обрабатывать сигналы, подверженные воздействию импульсных помех.

Фильтрация происходит следующим образом: исходные значения сортируются в порядке возрастания значения; и значение, находящееся в середине упорядоченного списка, поступает на выход фильтра. В случае чётного числа отсчётов в окне выходное значение фильтра равно среднему значению двух отсчётов в середине упорядоченного списка. Окно перемещается вдоль фильтруемого сигнала и вычисления повторяются на каждой итерации.

Отфильтрованная величина вычисляется по формуле:

$$Y[n] = \text{med}(\text{sort}(X[(n + 1 - M)..n])), \quad (2)$$

где  $X[(n + 1 - M)..n]$  – массив значений зашумленного сигнала;

$\text{sort}(X[(n + 1 - M)..n])$  – отсортированный массив значений зашумленного сигнала;

$\text{med}(\text{sort}(X[(n + 1 - M)..n]))$  – значение зашумленного сигнала, находящееся на центральной позиции в отсортированном массиве (если количество значений четное, то полу сумма средних);

$Y[n]$  – отфильтрованный сигнал на n-ом такте,  $M$  – настроечный параметр фильтра.

### 1.6.3 Комплементарный фильтр

Как известно, гироскоп измеряет угловую скорость вращения относительно трех осей. Для того чтобы получить значение угла ориентации датчика необходимо выполнить процедуру интегрирования сигнала гироскопа с течением времени. Точные гироскопы, такие как кольцевой лазер, слишком дороги и обладает слишком большим весом для применения на борту используемого БПЛА. С другой стороны, имеется менее точный полупроводниковые MEMS-гироскопы, которые лишены недостатков лазерных гироскопов. Однако, интегрирование данных с таких датчиков приводит к накоплению ошибки в вычислении угла ориентации и с течением



времени ошибка возрастает. Таким образом, используя один лишь гироскоп не получится измерить угловое положение устройства [15].

Акселерометр, в свою очередь, способен измерять гравитационное поле планеты, и соответственно по разложению гравитационной силы на три оси становится возможным определить абсолютное значение ориентации в пространстве. Тем не менее, и он весьма сильно подвержен воздействию помех. Например, дополнительное ускорение, вызванное движением датчика, непременно приведёт к сдвигу контролируемого направления силы тяжести, что в свою очередь приведет к неверным значениям углового положения. Для решения этой проблемы получаемые показания акселерометра фильтруют низкочастотным фильтром. Данный фильтр способен устранить высокочастотный шум, однако при этом происходит увеличение задержки сигнала относительно не отфильтрованного. Для компенсации этой задержки используются показания гироскопа [16].

Комплементарный фильтр объединяет в себе высокочастотный фильтр для гироскопа и низкочастотный фильтр для акселерометра и магнитометра. В отличие от работ, где используется полная матрица угловых состояний, в данной работе используется всего лишь одно значение, которое определяет ориентацию устройства относительно горизонтальной оси. Поэтому комплементарный фильтр имеет несколько измененный вид, представленный на рисунке 10, однако принцип его работы остается прежним.

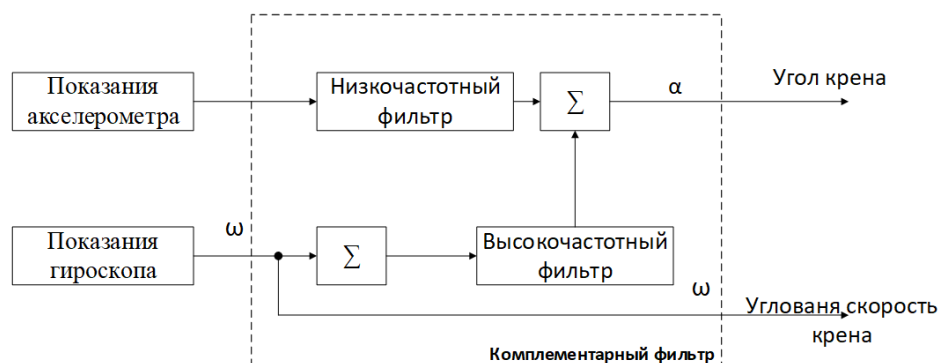


Рисунок 10 – Структурная схема комплементарного фильтра

Вначале каждой итерации работы фильтра с каждого сенсора снимаются текущие показания, которые, вместе с результатами, полученными

на предыдущей итерации, поступают на вход фильтра. Ниже приведена формула для вычисления этого угла:

$$\begin{aligned}\varphi(i+1) = (1 - \alpha) * (\varphi(i) + \omega_{GYRO}(i+1) * dt) \\ + \alpha * \varphi_{ACCEL}(i+1),\end{aligned}\tag{3}$$

где  $\varphi(i+1)$  – значение отфильтрованного угла крена в момент времени  $t = i+1$ ;

$\varphi(i)$  – значение отфильтрованного угла крена в момент времени  $t = i$ ;

$\omega_{GYRO}(i+1)$  – угловая скорость крена, полученная с гироскопа в момент времени  $t = i+1$ ;

$\varphi_{ACCEL}$  – значение угла крена, полученное с акселерометра в момент времени  $t = i+1$ ;

$\alpha$  – коэффициент фильтра (значение находится в диапазоне от 0 до 1);

$dt$  – периодичность опроса гироскопа.

Регулируя настроечный коэффициент фильтра, можно изменять соотношение между влиянием на выходную величину значений гироскопа и акселерометра.

## 1.7 Заключение по разделу 1

В ходе выполненной работы была изучена техническая документация по применяемому оборудованию. Были выбраны алгоритмы фильтрации сигналов МЕМС-датчиков. А также для работы с микроконтроллером было подобрано программное обеспечение.



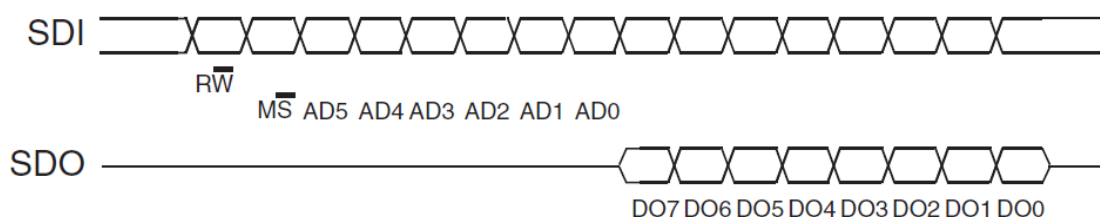


Рисунок 12 – Протокол чтения/записи

Адреса встроенных в микросхему регистров представлены в таблице 1 [8].

Таблица 1 – Адреса регистров

Name	Type	Register address		Default
		Hex	Binary	
WHO_AM_I	r	0F	000 1111	11010100
OUT_TEMP	r	26	010 0110	output
STATUS_REG	r	27	010 0111	output
OUT_X_L	r	28	010 1000	output
OUT_X_H	r	29	010 1001	output
OUT_Y_L	r	2A	010 1010	output
OUT_Y_H	r	2B	010 1011	output
OUT_Z_L	r	2C	010 1100	output
OUT_Z_H	r	2D	010 1101	output
FIFO_CTRL_REG	rw	2E	010 1110	00000000
FIFO_SRC_REG	r	2F	010 1111	output

Для того чтобы настроить единицы, в которых приходят данные гироскопа необходимо настроить чувствительность гироскопа. За это отвечает параметр Sensitivity (таблица 2). На основании данных таблицы 2 [8] можно сделать вывод о том, что для того, чтобы конвертировать сырые данные с гироскопа в градусы необходимо домножить выходное значение на  $(8.75; 17.50; 70) * 10^{-3}$  в зависимости от выбранного значения чувствительности прибора.

Таблица 2 – Значения параметров чувствительности

Symbol	Parameter	Test condition	Min.	Typ. <sup>(2)</sup>	Max.	Unit
So	Sensitivity	FS = 250 dps		8.75		mdps/digit
		FS = 500 dps		17.50		
		FS = 2000 dps		70		

Бит *CS* устанавливается в ноль для начала работы с микросхемой. Сама же считанная информация находится в битах *D00 – D07*. Используя стандартную библиотеку HAL от компании ST, была написана собственная библиотека для работы с микросхемой.

В конечном итоге после запуска микросхемы на чувствительности *FS = 500 dps* получились показания, представленные на рисунке 13. По данным на графике рисунка 13 можно сделать вывод о сильной зашумленности сигнала гироскопа, находящегося в покое.

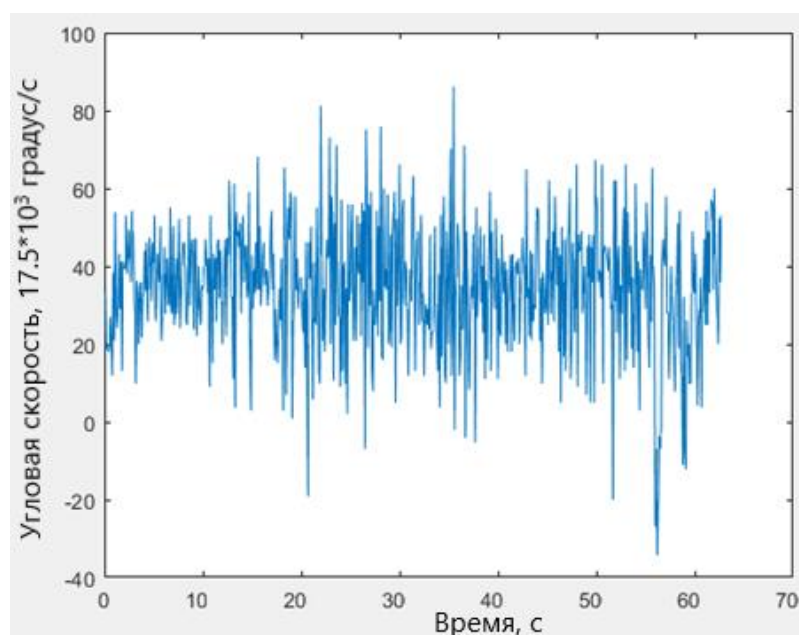


Рисунок 13 – Данные гироскопа в покое

Как известно, гироскоп измеряет значения угловых скоростей, из чего следует, что для получения абсолютного значения углового положения необходимо произвести интегрирования по формуле (4).

$$\theta(T) = \theta_0 + \int_0^T \omega(t) * dt, \quad (4)$$

где  $\theta(t)$  – значение угла в момент времени  $t = T$ ;

$\theta_0$  – значение угла в начальный момент времени;

$\omega(t)$  – функция угловой скорости.

Формула (4) предназначена для непрерывной функции угловой скорости. В данной работе измерение данных гироскопа происходит в дискретные моменты времени, с частотой дискретизации 100 Гц, т.е. показания считываются с периодом 10 мс. Так как измерение входного сигнала осуществляется с малым шагом, то в формуле (4) интеграл можно заменить суммой по способу левых прямоугольников, основанному на замене подынтегрального выражения дискретной функцией. Получившаяся формула представлена ниже:

$$\theta(T) = \theta_0 + \sum_{t=0}^T \omega(t) * dt \quad (5)$$

В формуле (5) значение  $dt$  соответствует 10 мс. Используя формулу (5) для расчета угла гироскопа, получим данные, представленные на графике рисунка 14.

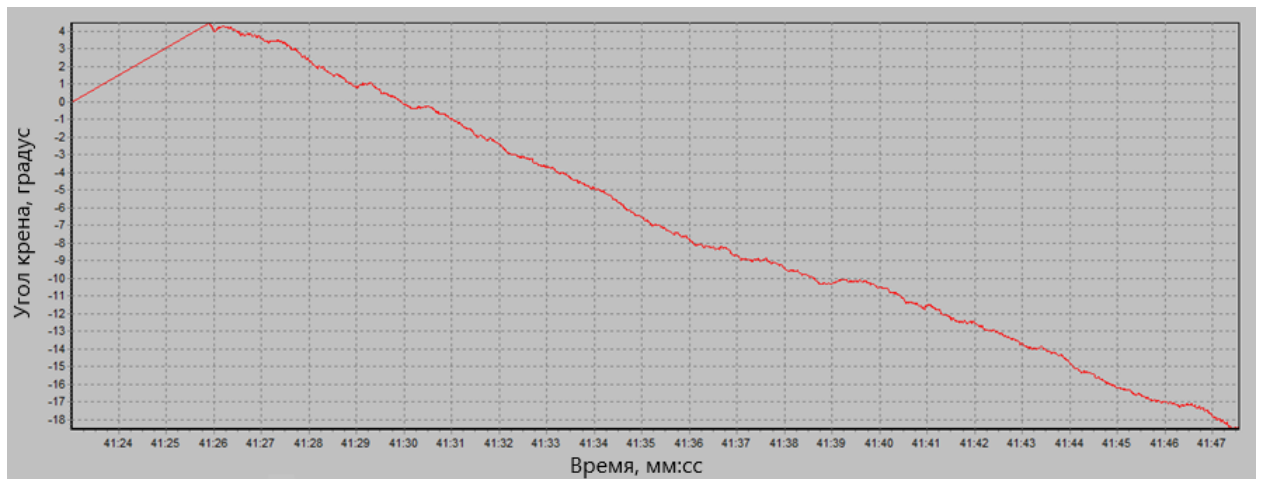


Рисунок 14 – Значение угла крена при интегрировании данных гироскопа

По графику на рисунке 14 видно, что угол крена постоянно уменьшается, однако плата лежала в покое. Это свидетельствует о том, что при интеграции происходит накопление ошибки измерения и эта ошибка значительная. Для того, чтобы избавиться от постоянной составляющей

ошибки интегрирования необходимо произвести первичную обработку выходной величины.

Для того чтобы оценить качество фильтрации был поставлен эксперимент, в ходе которого отладочная плата STM32 F3 Discovery была установлена на вращающуюся платформу, которая имитирует крен самолета. Платформа представляет собой сервопривод с прикрепленным к нему строительным углом. Фотография стенда представлена на рисунке 15.

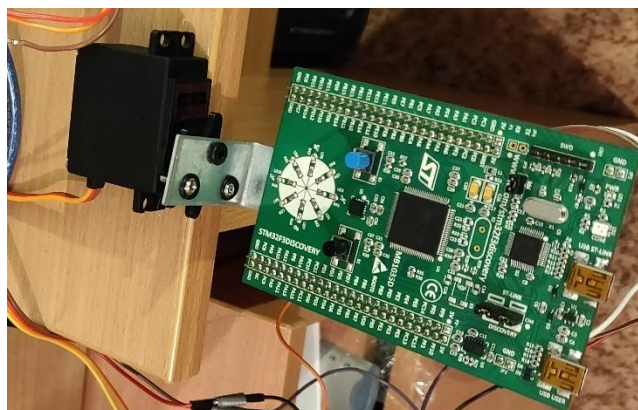


Рисунок 15 – Платформа для экспериментов

Для управления сервоприводом был составлен алгоритм на микроконтроллерной плате Arduino Nano, выполняющий разворот серво на 90 градусов в каждую из сторон с временным промежутком 2 секунды. Ознакомившись с технической документацией на данный сервопривод, была определена его операционная скорость, которая составляет  $\omega = \frac{60}{0.17} = 352.941$  градус/с. Это означает, что для совершения одного поворота на 90 градусов сервоприводу понадобится  $t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{90}{352.941} = 0.255$  с. Для сравнения алгоритмов фильтрации между собой предлагается измерять относительное время переходного процесса, равное отношению полученного времени переходного процесса к теоретически верному. Это поможет оценить временные задержки фильтра.

Так как выходной сигнал гироскопа представляет собой довольно сильно зашумленный сигнал с преобладаем колебаний относительно истинного значения, то его необходимо отфильтровать.

Результат фильтрации скользящим средним, используемая ширина окна равна 10 значениям, представлен на рисунке 16. А в таблицу 3 сведены результаты фильтрации при использовании разного значения параметра  $N$ .

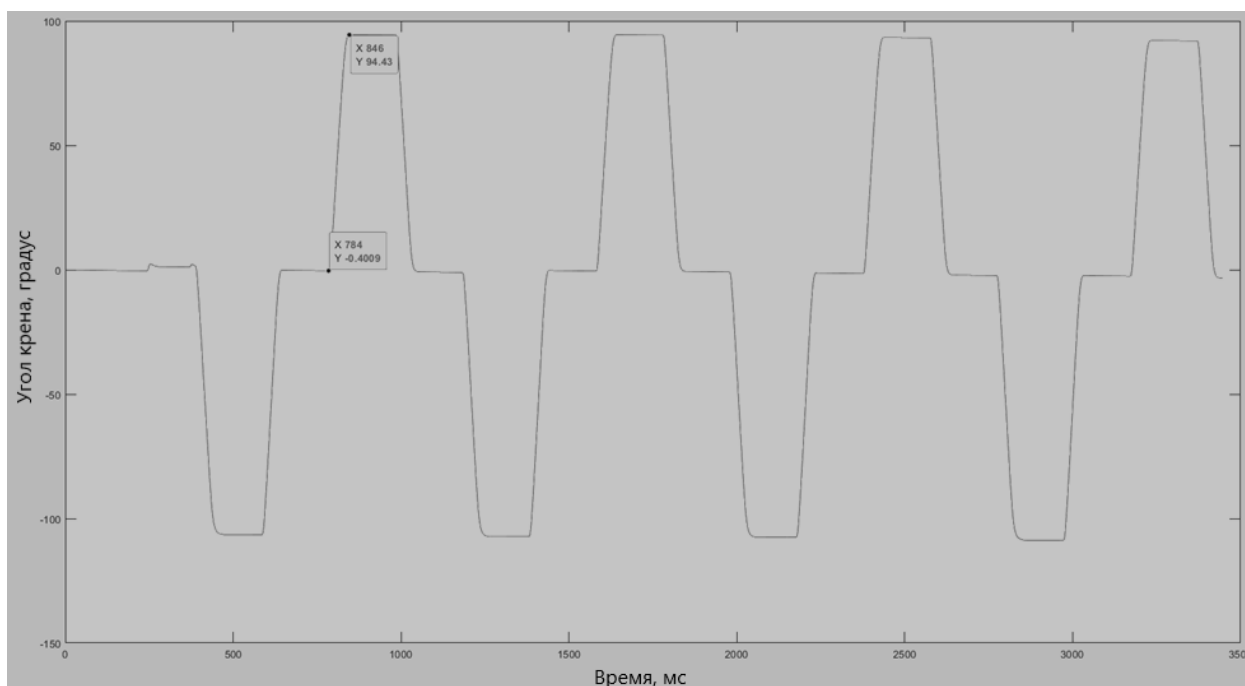


Рисунок 16 – Результат фильтрации фильтром скользящего среднего при ширине диапазона  $N = 10$

Таблица 3 – Результаты эксперимента

$N$	$t_{\text{переход}}, c$	$t_{\text{переход}} / t_{\text{теор}}, \%$	Смещение нуля за период
10	0,62	243	0,124
20	0,72	282	1,288
100	1,09	427	1,340

По представленным в таблице 3 результатам можно сделать вывод о том, что первичная обработка сигнала методом скользящего среднего позволяет значительно уменьшить смещение нуля гироскопа. Однако при сильно большом значении  $N$ , происходит задержка сигнала относительно не отфильтрованного.

Результат фильтрации медианным фильтром представлен на рисунке 17, при этом ширина окна  $N = 10$ . А в таблице 4 сведены результаты фильтрации при использовании разного значения параметра  $N$ .



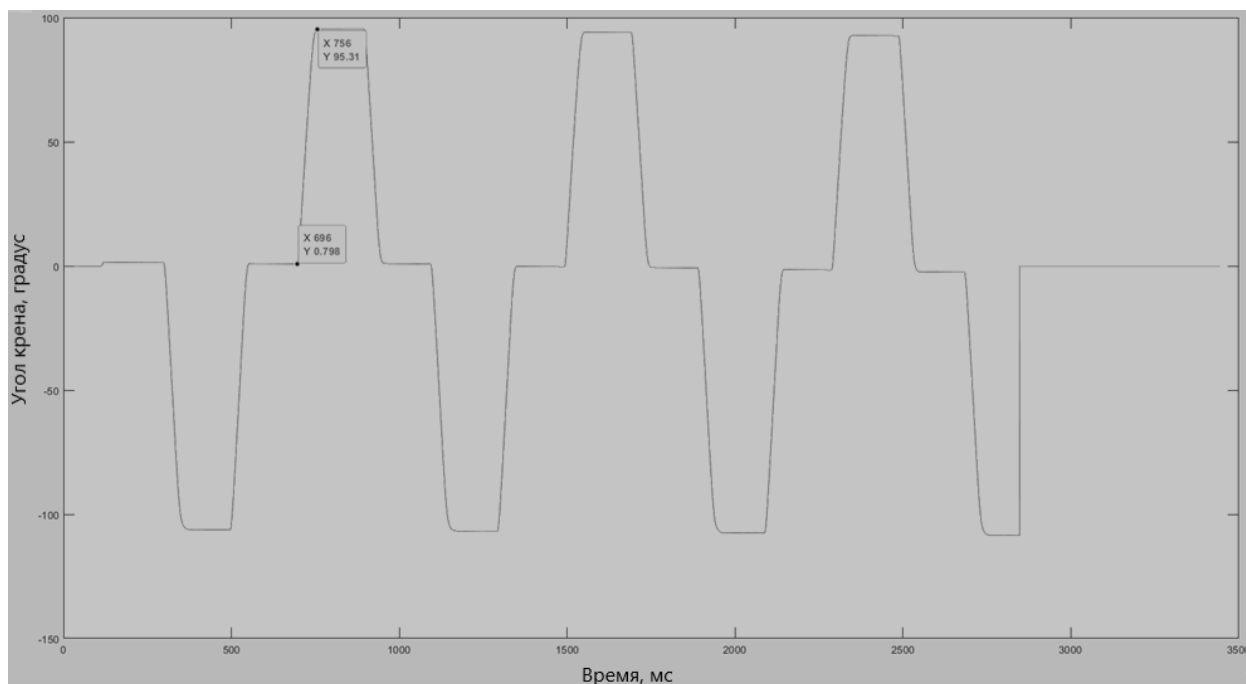


Рисунок 17 – Результат фильтрации медианным фильтром при ширине диапазона  $N = 10$

Таблица 4 – Результаты эксперимента

N	$t_{\text{переход}}, c$	$t_{\text{переход}} / t_{\text{теор}}, \%$	Смещение нуля за период
10	0,62	235	0.5462
20	0,75	294	0.2754
100	0.76	298	0.2749

По данным, представленным в таблице 4 можно сделать вывод о том, что получившиеся результаты не сильно отличаются от результатов фильтрации скользящим средним (таблица 3). Данный фильтр позволяет так же, как и фильтр скользящего среднего минимизировать ошибку интегрирования. Однако, медианный фильтр более сложный для вычисления на микроконтроллере. Поэтому конкретно в данном случае не целесообразно применять его, так как выходной сигнал гироскопа не содержит импульсных помех. В итоге было принято решение использовать фильтрацию скользящим средним с оптимально-минимальной шириной окна  $N = 10$ .

## 2.1.2 Подключение микросхемы LSM303DLHC

Схема подключения гироскопа LSM303DLHC к микроконтроллеру STM32F303VCT6 представлена на рисунке 18 [17]. Данный акселерометр поддерживает подключения по интерфейсу I<sup>2</sup>C

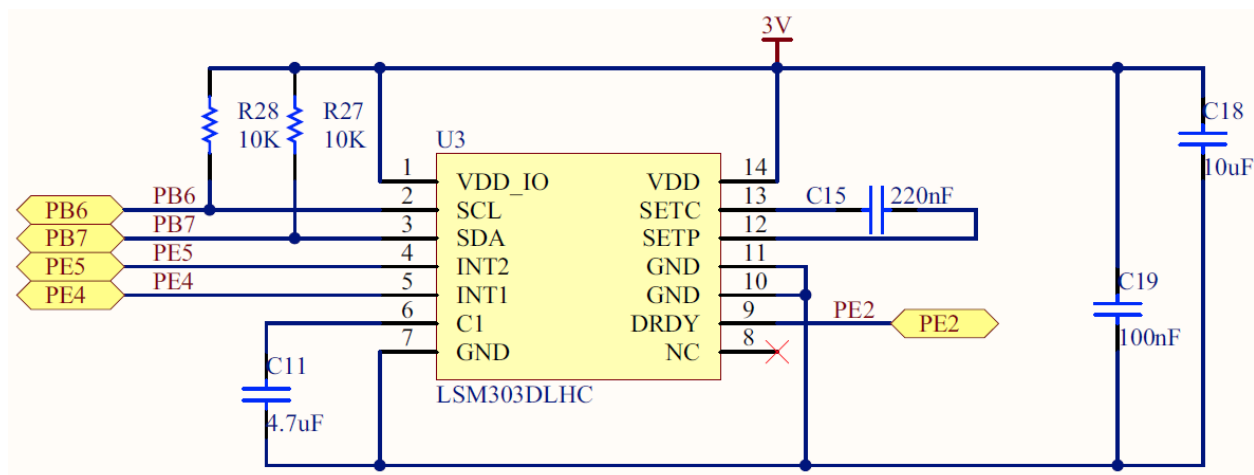


Рисунок 18 – Схема подключения датчика к микроконтроллеру

Адреса регистров микросхемы LSM303DLHC представлены на рисунке 19 [7].

Name	Slave address	Type	Register address		Default
			Hex	Binary	
OUT_X_H_M	Table 16	r	03	00000011	output
OUT_X_L_M	Table 16	r	04	00000100	output
OUT_Z_H_M	Table 16	r	05	00000101	output
OUT_Z_L_M	Table 16	r	06	00000110	output
OUT_Y_H_M	Table 16	r	07	00000111	output
OUT_Y_L_M	Table 16	r	08	00001000	output

Рисунок 19 – Адреса регистров

По данным на рисунке 19 видно, что выходные значения гироскопа хранятся в регистрах *OUT\_X\_H\_M* – *OUT\_Y\_L\_M*. Связи с тем, что выходное значение представляет собой 16 битовое значение, то на хранение одной переменной выделяется 2 байта информации. Так, например проекция ускорения на ось *X* микросхемы хранится в регистрах *OUT\_X\_H\_M* и *OUT\_X\_L\_M*.

Так как акселерометр измеряет только ускорение, то в статические моменты времени он будет измерять ускорение свободного падения  $g$ , разложенного на ортогональные оси микросхемы. Направление осей микросхемы представлено на рисунке 20 [7].

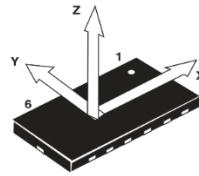


Рисунок 20 – Направление осей микросхемы

Так как на самолете микросхема размещена осью  $X$  направленной противоположно полету машины, то для получения значения угла крена следует использовать проекцию силы тяжести на оси  $Z$  и  $Y$ . Следовательно, угол крена самолета может быть определен по формуле (6).

$$\theta = \arctg \left( \frac{g_y}{g_z} \right), \quad (6)$$

где  $\theta$  – значение угла крена;

$g_y$  – значение проекции ускорения свободного падения на ось  $Y$  микросхемы.

$g_z$  – значение проекции ускорения свободного падения на ось  $Z$  микросхемы.

Так как расчет угла крена осуществляется по отношению проекций сил на соответствующие оси, то становится необязательным учитывать единицы измерения акселерометра.

После запуска микросхемы LSM303DLHC по формуле (6) было получено значение угла крена отладочной платы. График во временной оси представлен на рисунке 21.

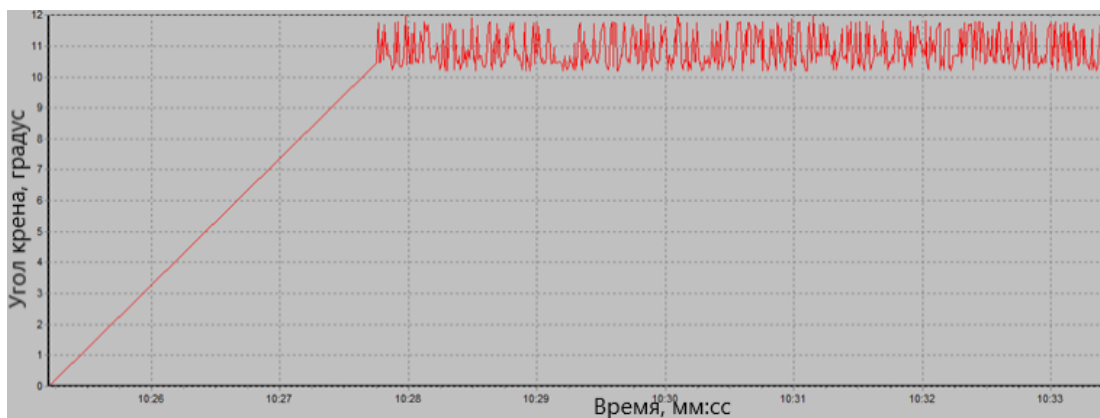


Рисунок 21 – График угла крена

По графику, представленному на рисунке 21 можно сделать вывод о том, что выходной сигнал акселерометра сильно зашумлен. Для извлечения полезного сигнала, необходимо произвести первичную фильтрацию выходного сигнала.

Результат фильтрации скользящим средним с использованием окна шириной в 10 значений представлен на рисунке 22. А в таблицу 5 сведены результаты фильтрации при использовании разного значения параметра  $N$ .

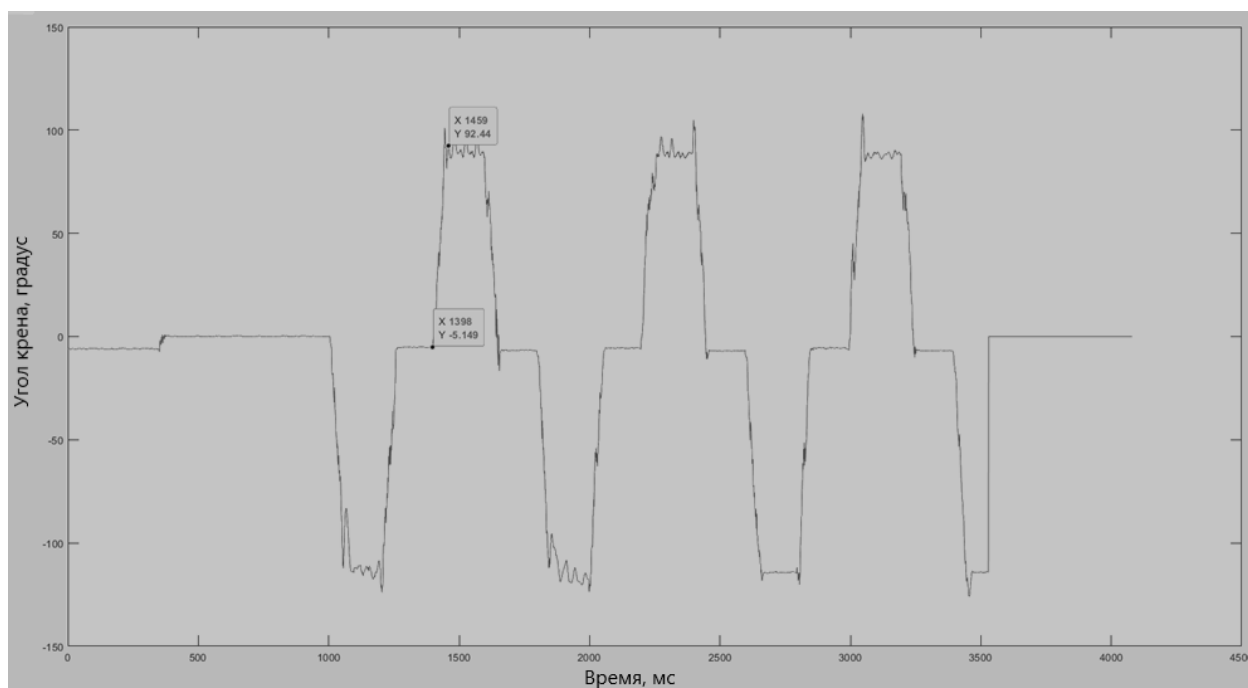


Рисунок 22 – Результат фильтрации фильтром скользящего среднего ширина окна  $N = 10$

Таблица 5 – Результаты эксперимента

N	$t_{\text{переход}}, c$	$t_{\text{переход}}/t_{\text{теор}}, \%$	Амплитуда колебаний
10	0,61	232	5,50
20	0,93	364	2,63
100	1,49	584	0

На основании данных таблицы 5 можно заключить о том, что фильтр скользящего среднего полностью подавляет импульсные помехи при ширине окна 100 и более. Однако, при таком большом окне происходит значительное искажение сигнала, что неприемлемо для скоростной системы самолета. В данном случае будет более целесообразно прибегнуть к фильтрации медианным фильтром, так как выходной сигнал акселерометра зашумлен импульсными помехами.

Результат фильтрации медианным фильтром с использованием окна шириной в 10 значений представлен на рисунке 23. А в таблице 6 сведены результаты фильтрации при использовании разного значения параметра  $N$ .

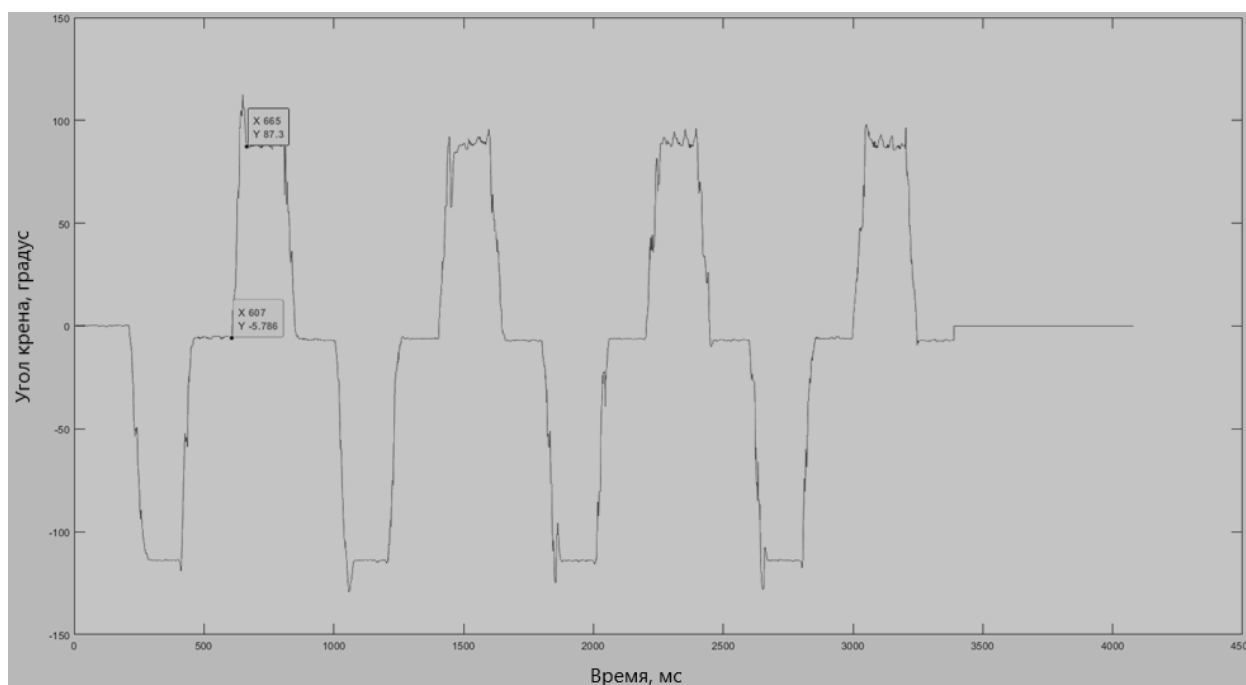


Рисунок 23 – Результат фильтрации медианным фильтром ширина окна  $N =$

10

Таблица 6 – Результаты эксперимента

N	$t_{\text{переход}}, c$	$t_{\text{переход}}/t_{\text{теор}}, \%$	Амплитуда колебаний
10	0,58	227	1,52
20	0,82	321	1,085
100	0,94	368	0

По данным, представленным в таблице 6 можно сделать вывод о том, что данный фильтр лучше подавляет импульсные помехи. Это следует из того, что амплитуда колебаний меньшая чем у фильтра скользящего среднего при одинаковых параметрах  $N$ . При всем при этом данный фильтр вносит меньшую задержку в систему. Однако, у медианного фильтра при полном исключении помехи ( $N$  значениях более 100) присутствует значительная задержка, это может стать причиной крушения самолета из-за большого перерегулирования будущей системы. Следовательно, необходимо использовать минимальное значение параметра  $N = 10$ .

В конечном итоге было выяснено, что использовать один лишь только акселерометр или гироскоп для измерения крена самолета нельзя. Поэтому было принято решение объединить значения этих двух датчиков.

### 2.1.3 Объединение показаний двух датчиков

Для объединения сигналов двух датчиков было решено использовать комплементарный фильтр. Алгоритм этого фильтра работает по формуле (3). На вход комплементарного фильтра поступают предварительно отфильтрованный сигнал гироскопа методом скользящего среднего при  $N = 10$  и акселерометра, обработанного медианным фильтром с  $N = 10$ . На рисунке 24 представлен график изменения величины угла крена при обработке комплементарным фильтром для значения параметра  $\alpha = 0,1$ . А в таблицу 7 сведены результаты фильтрации для разных параметров  $\alpha$ .

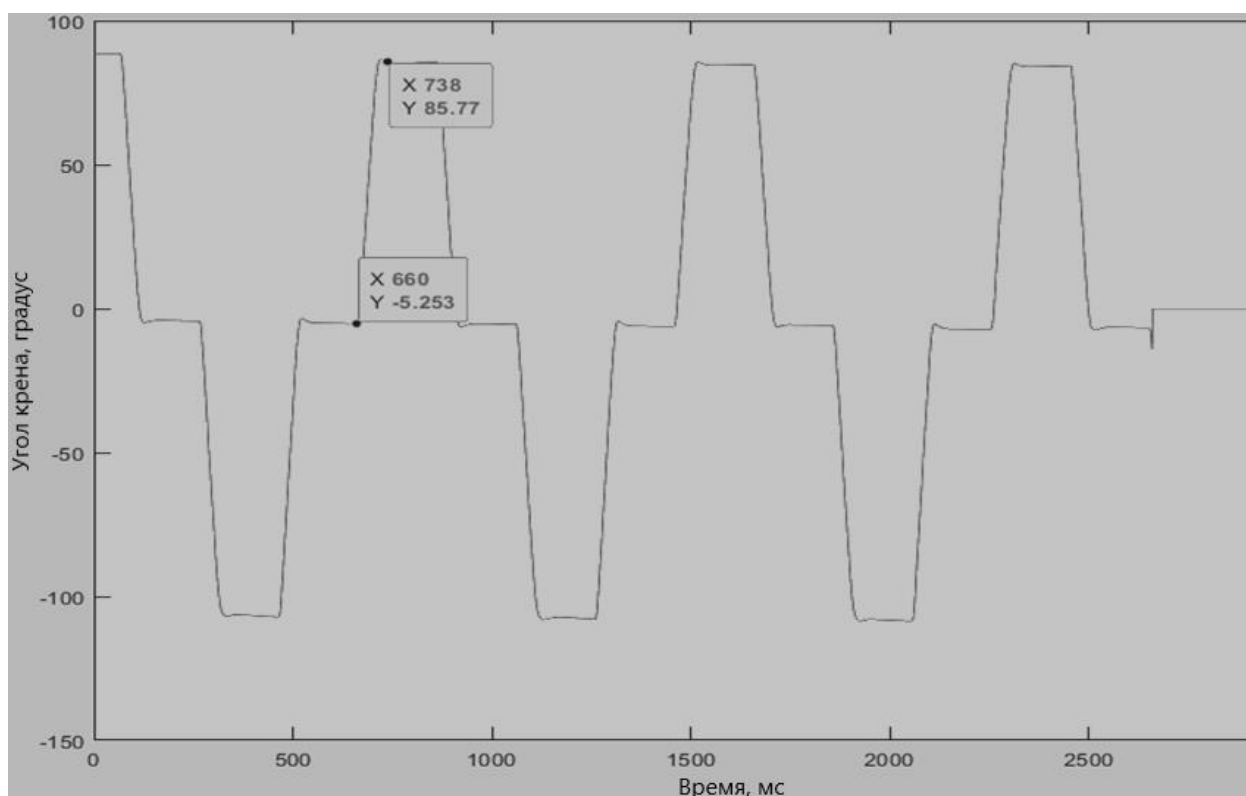


Рисунок 24 – Результат фильтрации комплементарным фильтром при параметре  $\alpha = 0.1$

Таблица 7 – Результаты эксперимента

$\alpha$	$t_{\text{переход}}, c$	$t_{\text{переход}}/t_{\text{теор}}, \%$	Смещение нуля	Амплитуда колебаний
0.05	-	-	0	0
0.1	0,78	306	0	0
0.2	1,33	521	0	0,52
0.9	0,8	313	0	1,085

По данным, представленным в таблице 7 можно сделать выводы о том, что при параметре фильтра  $\alpha = 0.1$  отфильтрованная величина обладает наименьшей задержкой и при этом у нее отсутствует смещение нуля со временем, которое присуще гироскопу, а также отсутствуют импульсные помехи от акселерометра. Используя данный фильтр становится возможным получить лучшее от обоих сенсоров: точность показаний в статических режимах и отсутствие смещения нуля от акселерометра и точность показаний в динамике от гироскопа

## **2.2 Определение передаточной функции между углом отклонения элеронов и углом крена**

Так как в данной работе необходимо разработать систему, стабилизирующую угол крена самолета, необходимо определить передаточную функцию между углом отклонения элеронов и угловой скоростью крена самолета. Так как объект управления представляет собой сложную систему, которая изготовлена вручную, т.е. с низким качеством соблюдения изначальных чертежей деталей, а технические характеристики сервоприводов не совпадают с реальными, математический расчет передаточной функции становится практически невозможным. Поэтому был использован принцип проектирования черный ящик, при котором не известно внутреннее строение системы, а известно только входное воздействие и выходной сигнал. Тогда для определения передаточной функции необходимо воспользоваться математическим пакетом «Matlab» с установленным расширением «System Identification Toolbox». Для определения передаточной функции в данном ПО необходимо иметь значения входных и выходных данных.

Для определения передаточной функции между углом отклонения элеронов и угловой скоростью крена, необходимо в расширение «System Identification Toolbox» подать график зависимости во временной области угловой скорости крена от угла отклонения элеронов. Для того, чтобы получить эти данные необходимо провести реальный полет на самолете и при этом выполнять запись угловой скорости крена и угла отклонения элеронов в лог файлы. Для решения этой задачи был применен полетный контроллер «Pixhawk PX4». Для исключения всех нежелательных факторов полет должен проходить в условиях, при которых внешние воздействия на самолет минимальны. Поэтому эксперимент был проведен в день с минимальным значением скорости ветра, которая составляла не более чем 2 м/с.



В результате эксперимента получены данные угловой скорости крена в единицах  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , которые представлены на рисунке 25. К сожалению, стандартный автопилот записывает вместо угла отклонения элеронов, только степень их отклонения в диапазоне от минус 4 500 до 4 500 условных единиц. График степени отклонения элеронов представлен на рисунке 26.

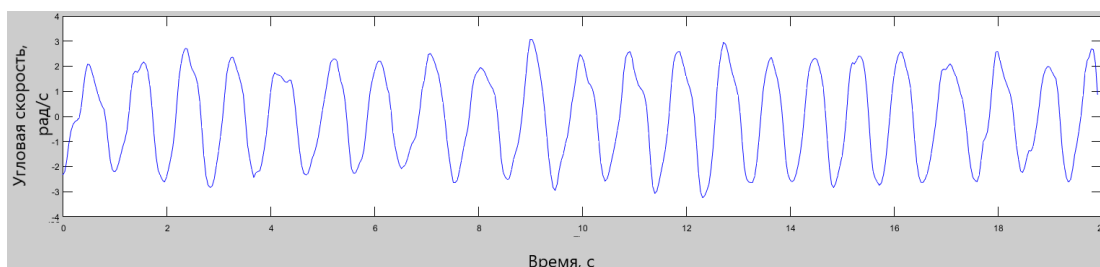


Рисунок 25 – Угловая скорость крена

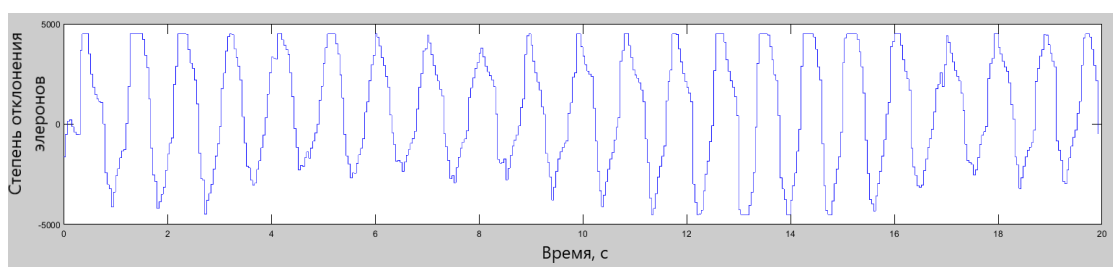


Рисунок 26 – Степень отклонение элеронов

После того как были определены необходимые данные для определения передаточной функции, их необходимо загрузить в блок «System Identification Toolbox». Загрузка данных в блок представлена на рисунке 27. После того как данные были загружены можно приступить к процедуре идентификации передаточной функции. Для это необходимо определить вид итоговой желаемой передаточной. В качестве стандартной передаточной функции между углом отклонения элеронов и угловой скоростью крена будет выступать апериодическое звено первого порядка [1].

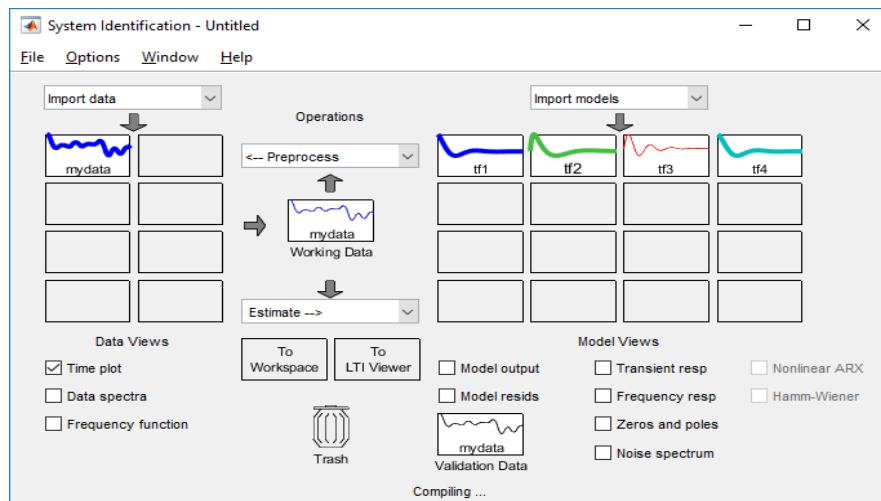
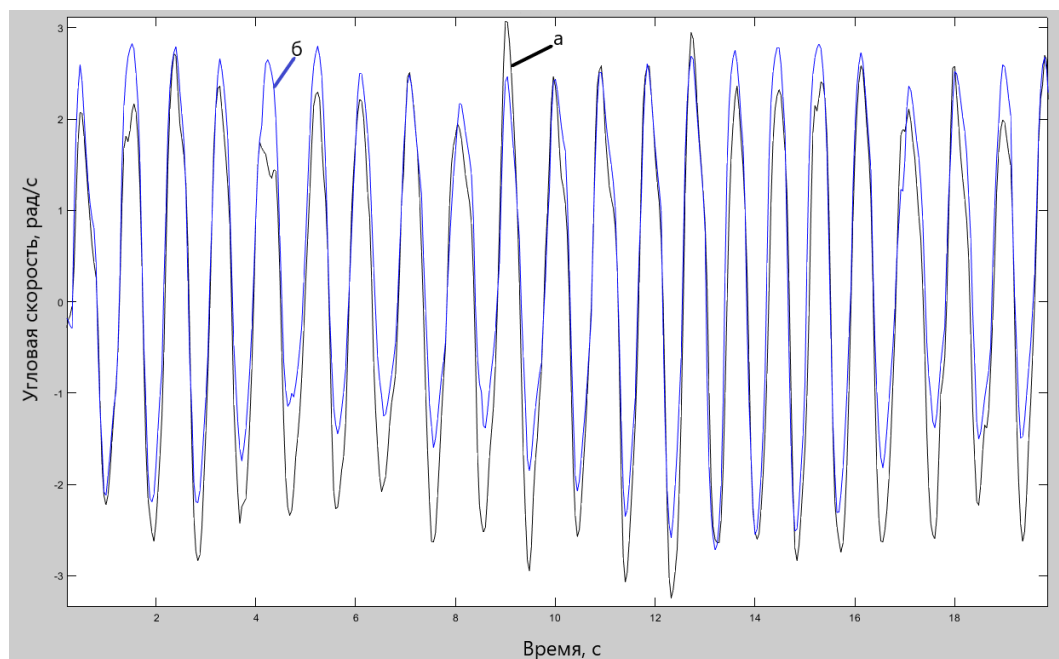


Рисунок 27 – Загрузка данных в блок «System Identification Toolbox»

После всех проделанных действий была получена передаточная функция системы. Степень соответствия входному сигналу составляет 67,12%. График полученной функции представлен на рисунке 28.



б – смоделированная система; а – исходная система

Рисунок 28 – Графики изменения угловой скорости крена во временной области

Итоговая передаточная функция выражена в формуле (7).

$$W(s) = \frac{0.01012}{s + 15.8} \quad (7)$$

Так как была определена передаточная функция между угловой скоростью крена и степенью отклонения элеронов, а управление будет производиться непосредственно углом крена самолета, то появляется необходимость получения передаточной функции между углом крена и степенью отклонения элеронов. Как уже было сказано для перехода от угловой скорости крена к углу крена, необходимо выполнить интегрирование по углу крена. Следовательно окончательная передаточная функция будет выглядеть следующим образом:

$$W(s) = \frac{0.01012}{s * (s + 15.8)} \quad (8)$$

### 2.3 Настройка параметров регулятора в математическом пакете Simulink Matlab

Так как была получена математическая модель системы можно приступить к настройке ПИД-регулятора, воспользовавшись функцией автоматической настройки регулятора в графической среде имитационного моделирования Simulink. Для этого необходимо построить модель системы в данной среде. Готовая для работы модель системы представлена на рисунке 29.

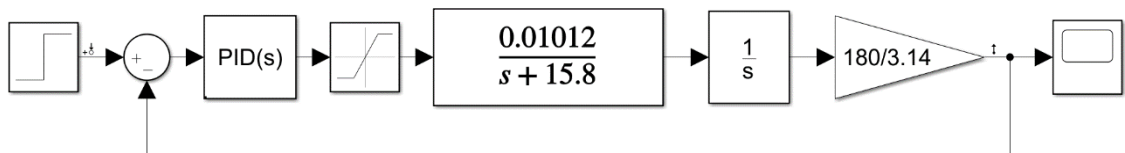


Рисунок 29 – Операторно-структурная схема в Simulink

Процедура настройки регулятора представлена на рисунке 30. При этом показатели качества переходного процесса получились следующими:

- время переходного процесса  $t_p = 0,749$  с
- перерегулирование  $\sigma = 11.5$  %

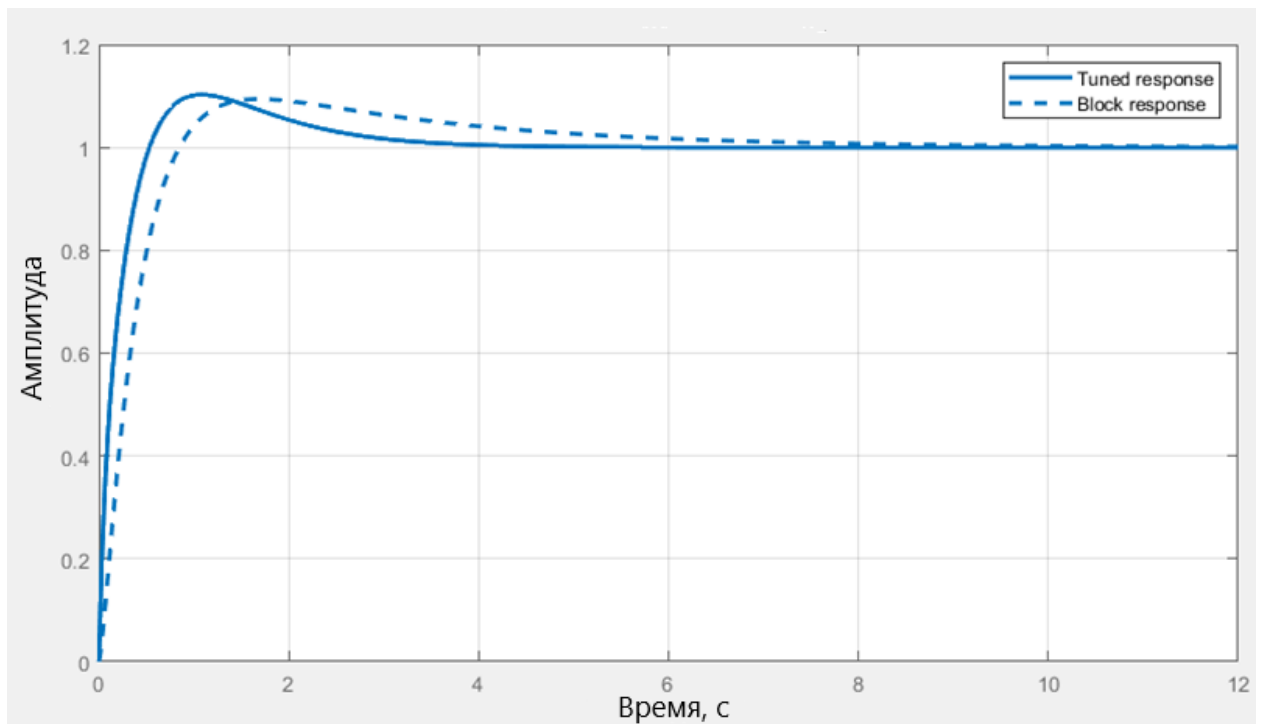


Рисунок 30 – Настройка регулятора

Настроенные коэффициенты регулятора представлены на рисунке 31.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	132.6312	73.2801
I	108.4795	26.6167
D	12.9667	1.8968
N	558.8634	228.5656
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.37 seconds	0.575 seconds
Settling time	2.86 seconds	5.66 seconds
Overshoot	10.2 %	9.39 %
Peak	1.1	1.09
Gain margin	-Inf dB @ 0 rad/s	-Inf dB @ 0 rad/s
Phase margin	90 deg @ 4.89 rad/s	76.6 deg @ 2.66 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 31 – коэффициенты регулятора

## 2.4 Реализация алгоритма дискретного ПИД-регулятора на языке программирования Си

Структурная схема ПИД-регулятора, используемая в математическом пакете «Simulink», представлена на рисунке 32.

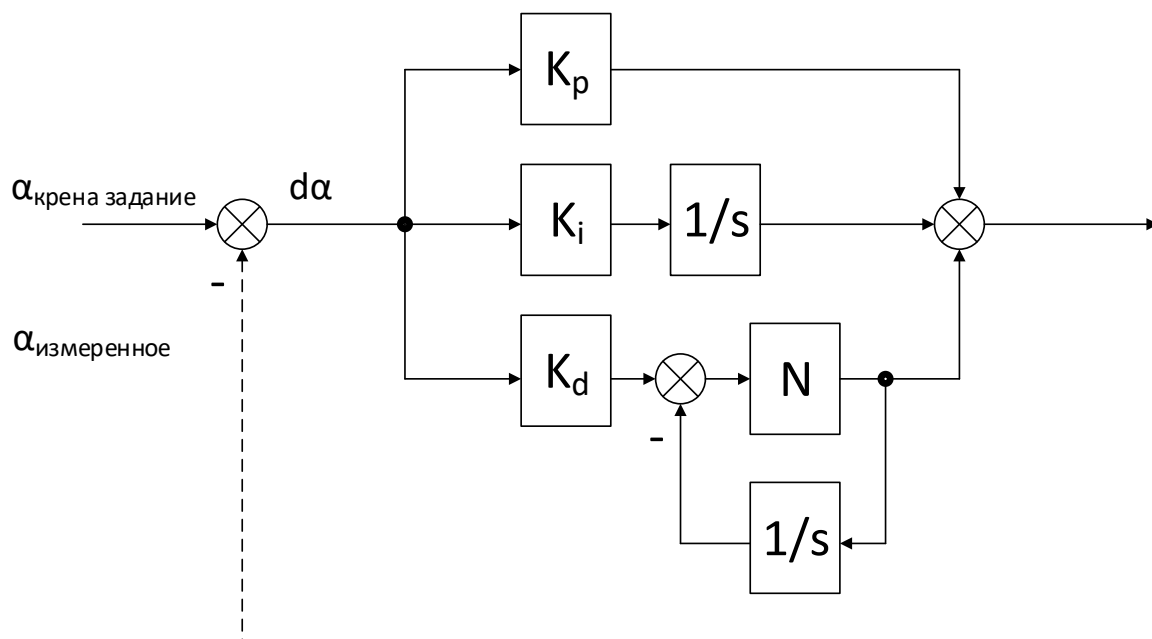


Рисунок 32 – Структурная схема ПИД-регулятора

Как известно из курса лекций теории автоматического управления параллельная форма записи уравнения ПИД-регулятора, структурная схема которого представлена на рисунке 32, выглядит следующим образом:

$$W(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d N}{1 + \frac{N}{s}}, \quad (9)$$

где  $K_p$  – пропорциональный коэффициент;

$K_i$  – коэффициент при интегральной составляющей;

$K_d$  – коэффициент при дифференциальной составляющей;

$N$  – коэффициент фильтрации дифференциальной составляющей.

Для того чтобы преобразовать регулятор (9) в его дискретный аналог необходимо конвертировать интегральную и дифференциальную части в их дискретные аналоги. Это можно сделать тремя разными способами: прямой Эйлер, обратный Эйлер и методом трапеций. В данной работе будет использоваться преобразование интегратора методом обратного Эйлера (Backward Euler). Формулы преобразования представлены ниже [18]:

$$Z\left(\frac{K_i}{s}\right) = \frac{K_i T_s z}{z - 1} \quad (10)$$

$$Z\left(\frac{K_d N}{1 + \frac{N}{S}}\right) = \frac{N(z-1)}{(1 + NT_s)z - 1} \quad (11)$$

Используя равенства (10) и (11) получим результирующее уравнение для дискретного ПИД-регулятора:

$$C(z) = K_p + \frac{K_i T_s z}{z-1} + \frac{K_d N(z-1)}{(z + NT_s)z - 1} \quad (12)$$

Так как передаточная функция системы является отношением Лапласового изображения выходного сигнала к входному при нулевых начальных условиях, то имеем следующее выражение:

$$U(z) = \left[ K_p + \frac{K_i T_s}{1 - z^{-1}} + \frac{K_d N(1 - z^{-1})}{(1 + NT_s) - z^{-1}} \right] E(z) \quad (13)$$

Приведение к общему знаменателю выражения (13) даст следующее выражение:

$$U(z) = \left[ \frac{K_p((1 + NT_s) - 2z^{-1} - NT_s z^{-1} + z^2) + K_i T_s((1 + NT_s) - z^{-1}) + K_d N(1 - z^{-1})^2}{(1 + NT_s) - 2z^{-1} - NT_s z^{-1} + z^{-2}} \right] E \quad (14)$$

Выражение (14) может быть переписано как:

$$\begin{aligned} U(z)((1 + NT_s) - 2z^{-1} - NT_s z^{-1} + z^{-2}) \\ = (K_p((1 + NT_s) - 2z^{-1} - NT_s z^{-1} + z^2) + K_i T_s((1 + NT_s) - z^{-1}) + K_d N(1 - z^{-1})^2) E(z) \end{aligned} \quad (15)$$

Приведения подобных в уравнении (15) даст следующее выражение:

$$\begin{aligned} U(z)((1 + NT_s) - (2 + NT_s)z^{-1} + z^{-2}) \\ = (K_p + K_p NT_s + K_i T_s + K_i T_s^2 N + K_d N + z^{-1}(-2K_p - K_p NT_s - K_i T_s - 2K_d N) + (K_p + K_d N)z^{-2}) E(z) \end{aligned} \quad (16) \quad (17)$$

$Z[f(k - \alpha)] = F(z)z^{-\alpha}$  по теореме смещения  $F(z) = Z[f(k)]$  следует, что уравнение для ПИД-регулятора будет выглядеть следующим образом [19]:

$$\begin{aligned} u[k](1 + NT_s) - u[k-1](2 + NT_s) + u[k-2] \\ = e[k](K_p + K_p NT_s + K_i T_s + K_i T_s^2 N + K_d N) - e[k-1](2K_p + K_p NT_s - K_i T_s + 2K_d N) + e[k-2](K_p + K_d N) \end{aligned} \quad (18)$$

В уравнении (18)  $u[k]$ ,  $u[k - 1]$   $u[k - 2]$  – выходной сигнал регулятора на  $k$ -ом,  $k - 1$  и  $k - 2$  шагах соответственно;  $e[k]$ ,  $e[k - 1]$  и  $e[k - 2]$  – входной сигнал рассогласования на  $k$ ,  $k - 1$  и  $k - 2$  шагах.

Уравнение (18) можно переписать следующим образом:

$$u[k] = \frac{2 + NT_s}{1 + NT_s} u[k - 1] - \frac{1}{1 + NT_s} u[k - 2] + \frac{K_p + K_p NT_s + K_i T_s + K_i T_s^2 N + K_d N}{1 + NT_s} e[k] - \frac{2K_p + K_p NT_s - K_i T_s + 2K_d N}{1 + NT_s} e[k - 1] + \frac{K_p + K_d N}{1 + NT_s} e[k - 2] \quad (19)$$

Выполнив замену  $\frac{2+NT_s}{1+NT_s}$  на  $k_{u1}$ ,  $\frac{1}{1+NT_s}$  на  $k_{u2}$ ,  $\frac{K_p+K_pNT_s+K_iT_s+K_iT_s^2N+K_dN}{1+NT_s}$  на  $k_e$ ,  $\frac{2K_p+K_pNT_s-K_iT_s+2K_dN}{1+NT_s}$  на  $k_{e1}$ ,  $\frac{K_p+K_dN}{1+NT_s}$  на  $k_{e2}$ , уравнение (19) станет выглядеть следующим образом:

$$u[k] = k_{u1}u[k - 1] - k_{u2}u[k - 2] + k_e e[k] - k_{e1}e[k - 1] + k_{e2}e[k - 2] \quad (20)$$

Используя уравнение (20) был написан алгоритм работы ПИД-регулятора на микроконтроллере, код представлен в «Приложение А».

## 2.5 Полетные испытания системы

После того как была написана прошивка автопилота для полетного микроконтроллера STM32F303VCT6, следует установить его в фюзеляж самолета. Расположение платы изображено на рисунке 33. Как только беспилотный летательный аппарат был готов к полетам, необходимо дожидаться летной погоды, т.е. отсутствия ветра.

В итоге не удалось дожидаться безветренной погоды, и испытания пришлось выполнять при относительно слабой силе ветра 7-8 м/с по прогнозу погоды в г. Караганда, Казахстан на 24 мая 2019 года. На рисунке 34 представлен стоп-кадр, снятый с бортовой камеры самолета, во время полета с включенной системой стабилизации.

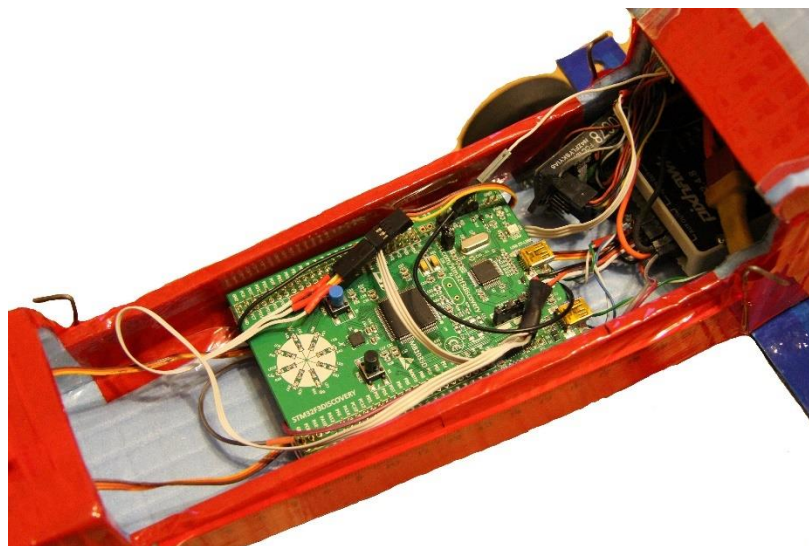


Рисунок 33 – Расположение микроконтроллера STM32 на борту самолета



Рисунок 34 – Стоп-кадр с бортовой камеры самолета

На рисунке 35 изображен график изменения угла крена самолета во временной области. По данному графику можно определить качество переходного процесса. Время переходного процесса получилось следующим:

$$T_p = 140 * 10^{-2} = 1.4 \text{ с}$$



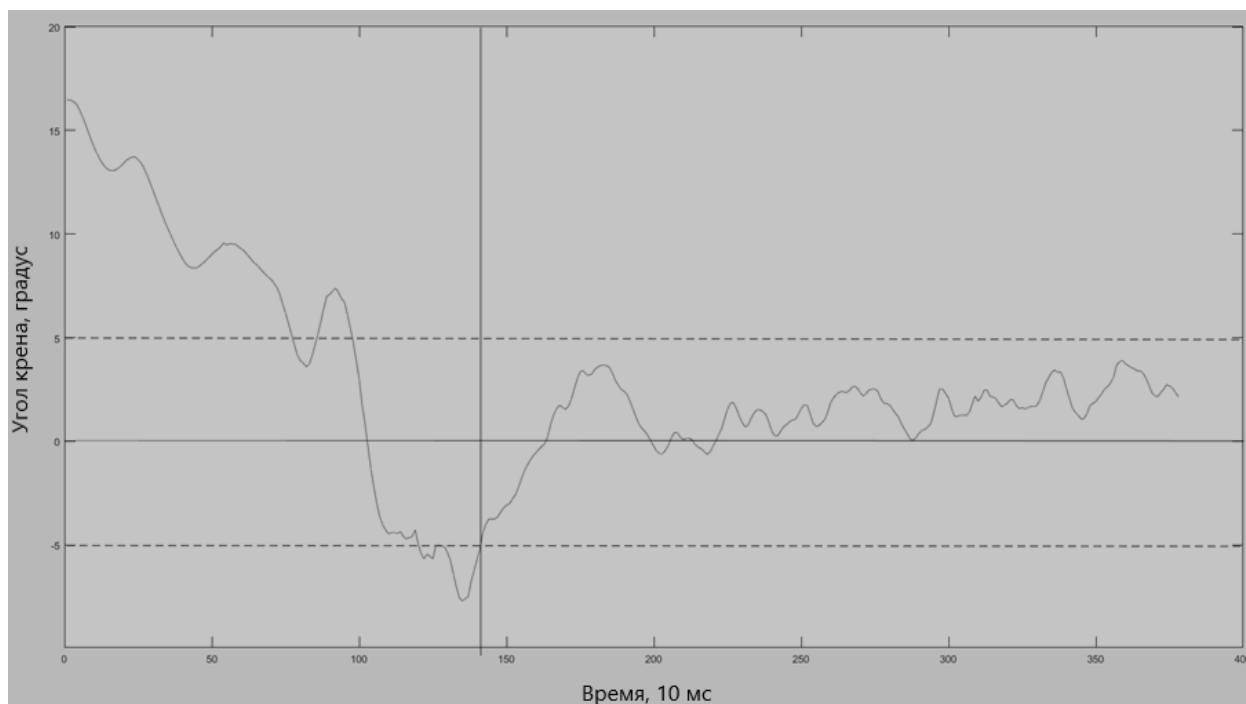


Рисунок 35 – График изменения крена самолета во временной области

## 2.6 Заключение по разделу 2

В данной бакалаврской работе была достигнута задача создания системы угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата самолетного типа по крену. Была изучена документация и по ней выполнено подключение и отладка имеющегося оборудования, а именно микросхема гироскопа L3GD20, микросхема акселерометра LSM303DLHC, непосредственно сам микроконтроллер STM32F303VCT6. Компоненты данной системой были объединены воедино для создания рабочего прототипа системы.

Также в ходе работы было произведено ознакомление с языком программирования Си. С помощью средств данного языка был написан управляющий алгоритм для микроконтроллера и выполнена его прошивка. В конечном итоге вся система была протестирована в реальном полете, в котором была продемонстрирована работоспособность системы. Однако, показатели качества переходного процесса отличаются от таковых,

полученных при моделировании системы. Это связано в первую очередь с тем, что в течении всего времени полета дул ветер.

### 3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

#### 3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Объектом исследования является система стабилизации крена беспилотного летательного аппарата самолетной схемы. Группу потребителей данной системы стабилизации могут составлять предприятия, на которых необходимо осуществлять контроль и мониторинг территорий больших площадей при помощи летательного устройства. Например, крупные нефтегазовые компании, частные охранные предприятия, МЧС, МВД. Сегментирование рынка произведено по следующим критериям: размер компании-заказчика и отрасль работы. Карта сегментирования представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Карта сегментирования

		Отрасль			
		Нефтегазовые компании	Авиапромышленность	Рекламные агентства	Охранные предприятия
Размер компании	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				

Согласно карте сегментирования, можно выделить следующие сегменты рынка: разработка системы стабилизации крена беспилотного летательного аппарата самолетной схемы для крупных и средних предприятий

нефтегазового сектора и авиапромышленности, а также для крупных рекламных агентств и охранных предприятий.

### 3.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо производить систематически, так как рынки пребывают в постоянном движении. Данный анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим конкурентам.

Среди производителей рассматриваемой системы были выделены следующие компании: DJI (конкурент 1), 3D Robotics (конкурент 2). Анализ представлен в таблице 9.

DJI – частная компания, являющаяся ведущим поставщиком беспилотных летательных аппаратов, микроконтроллеров, и видеооборудования. Компания 3D Robotics занимается созданием беспилотных летательных аппаратов для частных и корпоративных пользователей. Система предназначена для боковой стабилизации полета самолета.

Таблица 9 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Вычислительная мощность	0,18	3	5	4	0,54	0,9	0,72
2. Энергоэффективность	0,1	5	2	4	0,5	0,2	0,4
3. Объем памяти	0,07	3	5	4	0,21	0,35	0,28
4. Модульность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
5. Размеры	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
6. Вес	0,1	5	2	4	0,5	0,2	0,4
7. Помехоустойчивость	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4

Продолжение таблицы 9 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

1	2	3	4	5	6	7	8
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность	0,05	4	5	5	0,2	0,25	0,25
Таблица 9 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (продолжение)2. Уровень проникновения на рынок	0,05	2	5	5	0,1	0,25	0,25
3. Цена	0,1	5	1	4	0,5	0,1	0,4
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
Итого	1	44	43	46	4,00	3,85	4,10

Согласно критериям ресурсоэффективности можно выделить следующие слабые стороны проекта: слабая функциональная мощность, маленький объем встроенной flash памяти и низкая помехоустойчивость. Однако, продукт остается конкурентоспособным по оставшимся техническим характеристикам. Из сильных сторон можно выделить низкую потребляемую мощность, малый вес и модульность.

Для оценки экономической эффективности были выбраны следующие экономические критерии: конкурентоспособность продукта, уровень проникновения на рынок, цена и предполагаемый срок эксплуатации. По результатам анализа можно сделать выводы о том, что созданный продукт является конкурентоспособным в условиях существующего рынка по сравнению с конкурентами.

### 3.3 SWOT-анализ

Для исследования внутренней и внешней среды проекта был проведен комплексный анализ научно-исследовательского проекта – SWOT-анализ.

Итоговая матрица SWOT-анализа, полученная в результате реализации всех этапов исследования, приведена в таблице 10.

Таблица 10 – Матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>С1. Низкая стоимость.  С2. Модульность проекта.  С3. Низкое энергопотребление.  С4. Управление с заданными качествами переходного процесса.  С5. Учет особенностей БПЛА заказчика.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>Сл1. Неустойчивость к помехам.  Сл2. Малая вычислительная мощность.  Сл3. Время разработки.  Сл4. Сложность разработки.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1. Расширение области применения БПЛА.  В2. Выход на иностранный рынок.  В3. Упрощение процедуры регистрации БПЛА.  В4. Появление самодостаточных используемых на борту БПЛА модулей.</p>	<p>За счёт дешевизны и модульности проекта появляется возможность осваивания новых отраслей применения устройства и расширения функционала. Учет особенностей БПЛА заказчика позволяет увеличить качество стабилизации и снизить электропотребление, что ведет к сокращению затрат на обучение персонала в следствии упрощения управления, а также дает возможность использования проекта иностранными клиентами.</p>	<p>Изменение правительственной политики позволит выйти на новые рынки, с меньшими требованиями по помехозащищенности. При осваивании новых отраслей и выходе на иностранный рынок возможно появление и увеличение команды разработчиков и бюджета, что приведет к уменьшению времени разработки. Появление самодостаточных используемых на борту БПЛА модулей (тепловизор, лидар и др.) позволит уменьшить вычислительную нагрузку на бортовой контроллер.</p>

Продолжение таблицы 10 – Матрица SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны проекта</b>	<b>Слабые стороны проекта</b>
<b>Угрозы:</b> У1. Направленность продукта на узкую группу потребителей. У2. Экономический кризис У3. Высокая конкуренция на рынке. У4. Ужесточение правил регистрации БПЛА.	Низкая стоимость проекта позволит расширить круг потребителей. Наличие большого количества комплектаций и вариантов использования продукта, позволит сохранить спрос на продукт в кризис.	Увеличение функционала и мощности системы позволит стать системе более конкурентно способной. Выход на иностранные рынки позволят сохранить спрос при неблагоприятном изменении правительственной политики по отношении отрасли.

По результатам SWOT-анализа можно сделать выводы о том, что необходимо развивать и поддерживать на высоком уровне такие сильные стороны проекта, как низкая себестоимость, учет особенностей БПЛА заказчика и низкое энергопотребление. Наличие слабых сторон, таких как малая вычислительная мощность, низкая помехозащищенность снижают конкурентоспособность продукта, что может быть решено в будущем путем реализации новых возможностей.

### 3.4 Планирование научно-исследовательских работ

#### 3.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения исследования необходимы исполнители в лице руководителя и инженера. Перечень этапов, работ и исполнителей приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель, инженер
Теоретические исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Изучение существующих систем	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер
	5	Подбор компонентов для реализации системы	Инженер
Проведение ОКР			
Разработка и проектирование системы	6	Покупка комплектующих	Инженер
	7	Сборка системы	Инженер
	8	Создание программной части	Инженер
	9	Тестирование и отладка работы системы	Руководитель, инженер
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка полученных результатов	Руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	11	Проведение технико-экономических расчетов и оценка безопасности и экологичности проекта	Инженер
	12	Составление пояснительной записки	Инженер

### 3.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаях образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.



Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{min i} + 2t_{max i}}{5}, \quad (21)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (22)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Представим ленточный график в форме диаграммы Гранта. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо

воспользоваться формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (23)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22 \quad (24)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Полученные данные представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работы						Длительность работы в рабочих днях, $T_{pi}$		Длительность работы в календарных днях, $T_{ki}$ $t_{min}$ , чел- дни	
	$t_{min}$ , чел- дни		$t_{max}$ , чел- дни		$t_{ож}$ , чел- дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	3	3	6	6	4,2	4,2	2,1	2,1	2,562	2,562
Подбор и изучение материалов по теме		7		12		9		9		10,98
Изучение существующих систем		3		5		3,8		3,8		4,636
Календарное планирование работ по теме	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1,098	1,098

Продолжение таблицы 12 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работы						Длительность работы в рабочих днях, $T_{pi}$		Длительность работы в календарных днях, $T_{ki}$	
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ож}$ , чел-дни				$t_{min}$ , чел-дни	
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Подбор компонентов для реализации системы		2		8		4,4		4,4		5,368
Покупка комплектующих		1		1		1		1		1,22
Сборка системы		8		20		12,8		12,8		15,616
Создание программной части		5		10		7		7		8,54
Тестирование и отладка работы системы	3	3	7	7	4,6	4,6	2,3	2,3	2,806	2,806
Оценка полученных результатов	2		5		3,2		3,2		3,904	
Проведение технико-экономических расчетов и оценка безопасности проекта		6		12		8,4		8,4		10,248
Составление пояснительной записки		8		13		10		10		12,2
Итого							8,5	61,7	10,37	75,274

На основе полученной таблицы 12 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ с разбивкой по месяцам и декадам. График работ приведен в таблице 195.

Таблица 13 – Календарный план-график выполнения проекта

№ раб от	Вид работ	Исполнители	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
				февр.			март			апр.			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель, инженер	3	■											
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11		■										
3	Изучение существующих систем	Инженер	5			■									
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер	1			■									
5	Подбор компонентов для реализации системы	Инженер	5			■									
6	Покупка комплектующих	Инженер	1				■								
7	Сборка системы	Инженер	16					■							
8	Создание программной части	Инженер	9						■						
9	Тестирование и отладка работы системы	Руководитель, инженер	3							■					
10	Оценка полученных результатов	Руководитель	4							■					
11	Проведение технико-экономических расчетов и оценка безопасности проекта	Инженер	10								■				
12	Составление пояснительной записки	Инженер	12									■			

■ - инженер      ■ - руководитель

### 3.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

#### 3.5.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi} \quad (25)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования;

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов;

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

В таблице 14 сведены данные о материальных затратах на научное исследование.

Таблица 14 – Материальные затраты НТИ

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Ноутбук HP Pavilion 15	Шт.	1	20 000	20 000
ЕРО беспилотный летательный аппарат самолетной схемы	Шт.	1	8500	8500
Цифровой сервопривод Emax ES08MDII	Шт.	4	503	2012
Бесколлекторный мотор Sunnysky x2216	Шт.	1	1500	1500
Радиоаппаратура Flysky FS-i6X	Шт.	1	3000	3000

Продолжение таблицы 14 – Материальные затраты НТИ

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Полетный контроллер Pixhawk Px4	Шт.	1	4000	4000
Отладочная плата STM32 Discovery F3	Шт.	2	2500	5000
Аккумуляторная батарея ZOP Power 11.1V 5000mAh	Шт.	2	2200	4400
Универсальное зарядное устройство skyrс imax b6	Шт.	1	2000	2000
Комплект бортовой электроники	Шт.	1	2000	2000
Бортовая камера RunCam 2	Шт.	1	5200	5200
2-х осевой стабилизирующий подвес для камеры	Шт.	1	2800	2800
6-ти пиновый конвертер USB/UART CP2102	Шт.	2	180	360
Затраты на транспортировку, 3%				1 823,16
Итого				60 595,16

Таким образом материальные затраты составили 60 595,16 рублей.

### 3.5.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия,

выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере (20 – 30) % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{ЗП} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (26)$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата;

$З_{доп}$  – дополнительная заработная плата ((12 – 20) % от основной).

Основная заработная плата руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} * T_p, \quad (27)$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$З_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн.

Среднедневная зарплата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}, \quad (28)$$

где  $З_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Баланс рабочего времени приведен в таблице 15.

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52	52
– выходные дни		
– праздничные дни	14	14

Продолжение таблицы 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Потери рабочего времени – отпуск – невыходы по болезни	48	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$З_m = З_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (29)$$

где  $З_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 - 0,5;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска.

Расчет основной платы представлен в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$З_m$ , руб	$З_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$З_{осн}$ , руб.
Руководитель	33 664	-	-	1,3	43 763,2	1 813,29	8,5	15 412,95
Инженер	12 663	-	-	1,3	16 461,9	682,09	61,7	42 084,75
Итого:								57 497,7

### 3.5.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{дон} = k_{дон} \cdot З_{осн}, \quad (30)$$

где  $k_{дон}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Расчет дополнительной заработной платы приведен ниже:



$$З_{\text{доп Р}} = 0,13 * 15\,412,95 = 2\,003,68$$

$$З_{\text{доп И}} = 0,13 * 42\,084,75 = 5\,471,02$$

Итого – 7 474,7 рубля.

### 3.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (31)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  - коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Расчет приведен в таблице 17.

Таблица 17 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений	Отчисления
Руководитель	15 412,95	2 003,68	0,271	4 719,91
Инженер	42 084,75	5 471,02		12 887,61
Итого				17 607,52

Получили, что всего будет перечислено 17 607,52 руб. во внебюджетные фонды.

### 3.5.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (32)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов, 16 %.

Материальные затраты учитываются с учетом количества использованной электроэнергии. Для юридических лиц стоимость 1 кВт\*ч составляет 5,8 рублей. В среднем на работу с компьютером затрачивается 8 часов в день, всего на работу с компьютером затрачивается около 60 дней. Ноутбук с подключенным к нему внешним монитором потребляет в среднем 120 Вт в час (суммарно за все время использования). На борту самолета используются литий полимерный аккумулятор емкостью 5 000 мАч и напряжением 11,1 В. В процессе создания системы было произведено 40 циклов разрядки и зарядки (было потреблено  $11.1 \cdot 5 \cdot 40 = 2\,220$  Вт электроэнергии). Следовательно, затраты на электроэнергию составят:

$$З_{\text{эн}} = 0.12 \cdot 8 \cdot 60 \cdot 5.8 + 2.2 \cdot 5.8 = 346$$

В итоге величина накладных расходов получается равной:

$$C_{\text{накл}} = 0.16 \cdot (57\,497.7 + 7\,474.7) = 10\,395.58$$

### 3.5.6 Формирование бюджета затрат НТИ

Основой для формирования бюджета затрат научно-исследовательского проекта является рассчитанная величина затрат. Данная величина также служит для формирования договора с заказчиком, где служит нижним пределом затрат на разработку проекта.

Определение бюджета затрат приведено в таблице 18.

Таблица 18 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты НТИ	60 595,16
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	57 497,7
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	7 474,7

Продолжение таблицы 18 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб
4. Отчисление во внебюджетный фонды	17 607,52
5. Расходы на электроэнергию	346
5. Накладные расходы	10 395,58
6. Бюджет затрат НТИ	916,7

### 3.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Интегральный показатель эффективности научного исследования состоит из двух составляющих: интегральный показатель финансовой эффективности и интегральный показатель ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности получается в ходе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Так как различные варианты исполнения проекта отличаются только программным обеспечением, установленным на бортовой контроллер, бюджет затрат будет одинаковым. Бюджет затрат приведен в таблице 18.

Интегральный финансовый показатель эффективности рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (33)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп } i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость i-го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{153\,916,7}{153\,916,7} = 1$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения проекта может быть определен по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i * b_i, \quad (34)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для i-го варианта исполнения;

$a_i$  – весовой коэффициент i-го варианта исполнения;

$b_i$  – оценка в баллах для i-го варианта исполнения.

Таблица 19 применяется для расчета интегрального показателя ресурсоэффективности.

Таблица 19 – Сравнительная оценка вариантов исполнения

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Качество регулирования	0,3	5	4
2. Потребление электрической энергии	0,2	3	5
3. Вычислительная мощность	0,1	5	3
4. Нарботка на отказ	0,2	4	5
5. Помехоустойчивость	0,1	4	5
6. Время отклика	0,1	5	4
Итого	1		

Ниже приведен расчет интегрального показателя ресурсоэффективности вариантов исполнения:

$$I_{p1} = 0,3 * 5 + 0,2 * 3 + 0,1 * 5 + 0,2 * 4 + 0,1 * 4 + 0,1 * 5 = 4,3$$

$$I_{p2} = 0,3 * 4 + 0,2 * 5 + 0,1 * 3 + 0,2 * 5 + 0,1 * 5 + 0,1 * 4 = 4,4$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{исп1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}}, \quad I_{исп2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр}} \text{ и т. д.} \quad (35)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки осуществляется по формуле, представленной ниже:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}} \quad (36)$$

Рассчитанные данные сведены в таблицу 20.

Таблица 20 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,3	4,4
3	Интегральный показатель эффективности	4,3	4,4
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,977	

На основании данных таблицы 20 можно сделать вывод о том, что более эффективным является первый вариант исполнения разработки.

## **4 Социальная ответственность**

### **Введение**

В данной работе разработана система угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата самолетной схемы.

Разработанная система применяется для стабилизации (удерживания определенного угла) горизонтального полета беспилотного летательного аппарата самолетной схемы заказчика. БПЛА с данной системой на борту целесообразно применять для автоматизированного мониторинга обширных территориальных владений заказчика, таких как протяженные линии магистральных нефтегазопроводов.

Непосредственным пользователем разработанной системы является оператор беспилотных летательных устройств.

Работа выполнялась в 117а аудитории 10 корпуса НИ ТПУ в отделении автоматизации и робототехники.

### **4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

В данном подразделе рассматриваются характерные для проектируемой рабочей зоны правовые нормы трудового законодательства. А также приводятся основные эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны исследователя проектируемой рабочей зоны в производственных условиях для создания комфортной рабочей среды.

#### **4.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Согласно «Трудовому кодексу Российской Федерации» от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 01.04.2019), рабочее время - время, в течение которого работник в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и условиями трудового договора должен исполнять трудовые обязанности, а также иные периоды времени, которые в соответствии с настоящим Кодексом,

другими федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации относятся к рабочему времени [21].

На предприятии, где будет эксплуатироваться разработанная система, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

Порядок исчисления нормы рабочего времени на определенные календарные периоды (месяц, квартал, год) в зависимости от установленной продолжительности рабочего времени в неделю определяется федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере труда [21]. (часть третья введена Федеральным законом от 22.07.2008 N 157-ФЗ)

Работодатель обязан вести учет времени, фактически отработанного каждым работником.

#### **4.1.2 Основные эргономические требования к правильному расположению и компоновке рабочей зоны исследователя.**

Управление разрабатываемой системой предполагает наличие оператора, который взаимодействует с ней через пульт управления в положении сидя.

Поэтому рабочее место должно быть организовано с учетом эргономических требований согласно ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» и ГОСТ 12.2.061-81 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам» [22].

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»:

- Конструкция, взаимное расположение элементов рабочего места (органы управления, средства отображения информации и т.д.) должны

соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы.

- Рабочее место должно быть организовано в соответствии с требованиями стандартов, технических условий и (или) методических указаний по безопасности труда.

- Рабочее место должно обеспечивать выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля.

- Выполнение трудовых операций "часто" и "очень часто" должно быть обеспечено в пределах зоны легкой досягаемости и оптимальной зоны моторного поля.

- При проектировании оборудования и организации рабочего места следует учитывать антропометрические показатели женщин (если работают только женщины) и мужчин (если работают только мужчины); если оборудование обслуживают мужчины и женщины - общие средние показатели мужчин и женщин.

- Организация рабочего места и конструкция оборудования должны обеспечивать прямое и свободное положение корпуса тела, работающего или наклон его вперед не более чем на 15°.

## **4.2 Производственная безопасность**

### **4.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований в лаборатории, при разработке или эксплуатации проектируемого решения.

Для идентификации потенциальных факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [23]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в таблице 21.



Таблица 21 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Вид работы	Нормативные документы
1. Движущиеся твердые объекты (лопасти винта БПЛА)	Разработка инженером и эксплуатация оператором системы угловой стабилизации БПЛА	1. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
2. Повышенный уровень шума на рабочем месте		2. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки".
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны		3. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.
4. Отклонение показателей микроклимата		4. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278- 03 "Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий".
5. Наличие электромагнитных полей радиочастотного диапазона		5. ГОСТ 12.1.030-81 (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
6. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека		6. ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля (с Изменением N 1)

#### **4.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего)**

##### **Движущиеся твердые объекты (лопасти винта БПЛА)**

В объекте исследования используется двух лопастной винт, вращаемый бесколлекторным двигателем на высоких оборотах для создания движущей силы тяги. Максимальные обороты двигателя могут достигать до 17 640 оборотов в минуту.

Основные последствия механических опасностей для данного объекта исследования:

- колото-резанные ранения мягких тел человека;
- попадание под удар.

К средствам защиты работающих от механического травмирования (физического опасного фактора) в соответствии с ГОСТ 12.4.125-83 ССБТ относятся [24]:

- оградительные устройства в виде кожухов;
- блокировочные устройства;
- тормозные устройства;
- устройства дистанционного управления;

При разработке инженер имеет непосредственный контакт с вращающимися лопастями винта. Это связано с тем, что запуск БПЛА производится с рук. Следовательно, необходимо разработать ряд мер предосторожности.

В системе предусмотрено специальное электронное блокировочное устройство в виде клавиши, которую нужно удерживать в течении 5 секунд для того, чтобы запустился двигатель. Снятие блокировки необходимо осуществлять непосредственно перед запуском устройства. Дополнительно от случайного срабатывания при транспортировке предусмотрен специальный передвижной кожух. Запуск двигателя осуществляется при помощи дистанционной радиоаппаратуры управления.

Дополнительно ко всему предполагается использование оператором таких средств индивидуальной защиты, как защитные перчатки и защитная одежда.

### **Шум**

Производственным шумом называют совокупность различных шумов, возникающих во время производства и неблагоприятно воздействующих на организм рабочего. Шум может привести к нарушениям слуха (в случае постоянного нахождения при шуме более 85 децибел(dB)), а также может быть фактором стресса и повысить систолическое кровяное давление. Дополнительно, он может способствовать несчастным случаям, маскируя предупреждающие сигналы и мешая сконцентрироваться. Источником шума в системе является бесколлекторный двигатель и вращающиеся лопасти винта.

Шум может взаимодействовать с другими факторами угрозы на производстве, увеличивая риск для работников.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, в производственных помещениях при выполнении основных и вспомогательных работ уровни шума на рабочих местах не должны превышать предельно допустимых значений, установленных для данных видов работ в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами. Так, согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96 при напряженности труда легкой степени предельно допустимые уровни звука составляют 80 дБА [25].

При необходимости уровень шума можно снизить, используя средства индивидуальной защиты органов слуха, таких как специальные звуконепроницаемые вкладыши или наушники.

### **Производственное освещение**

Основная задача освещения – создание наилучших условий для обзора объекта. Недостаточное освещение влияет на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность, на психику человека, его эмоциональное состояние, вызывает усталость центральной

нервной системы, возникающей в результате прилагаемых усилий для опознания четких или сомнительных сигналов [26].

Требования к освещению [27]:

- Требования к освещению предусматривают применение в качестве источников света люминесцентных ламп типа ЛБ. При местном освещении разрешается использовать лампы накаливания.

- Требования к освещению запрещают использование светильников без рассеивателей и экранирующих решеток.

- В зоне углов излучения от 50 до 90 градусов (с вертикалью в поперечной и продольной плоскости), яркость светильников общего освещения не должна превышать 200 кд/кв.м., защитный угол светильников - не менее 40 градусов.

- Для светильников местного освещения необходим непросвечивающий отражатель с защитным углом 40 градусов или больше.

- Осветительные установки общего освещения должны обладать Кз (коэффициентом запаса) равным 1,5.

- Применение газоразрядных ламп в светильниках с ВЧ ПРА позволяет не превышать значение минимально допустимого коэффициента пульсации (5%), для любых типов светильников.

- Требования к освещению обязывают совершать проведение чистки стекол оконных рам и светильников как минимум два раза в год и своевременная замена перегоревших ламп светильников для обеспечения указанных выше нормированных значений освещенности помещений.

К средствам нормализации освещения относятся [27]:

- источники света;
- осветительные (световые) приборы;
- световые приборы;
- светозащитные устройства;
- светофильтры.

К средствам индивидуальной защиты глаз – защитные очки и к СИЗ лица и глаз – щитки.

### **Микроклимат**

Основные виды работ, выполняемыми инженером, по степени физической тяжести, можно отнести к категории легких работ Ia. В таблице 22 приведены оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений для оператора [28].

Таблица 22 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Температура воздуха, С <sup>0</sup>	Температура поверхностей, С <sup>0</sup>	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	(21 – 23)	(20 – 24)	(40 – 60)	0,1
Теплый	(23 – 25)	(22 – 26)	(40 – 60)	0,1

Профилактика перегрева организма работника в нагревающем микроклимате включает следующие мероприятия:

- нормирование верхней границы внешней термической нагрузки на допустимом уровне применительно к восьмичасовой рабочей смене;
- регламентация продолжительности воздействия нагревающей среды для поддержания среднесменного теплового состояния на оптимальном или допустимом уровне;
- использование специальных средств коллективной и индивидуальной защиты, уменьшающих поступление тепла извне к поверхности тела человека и обеспечивающих допустимый тепловой режим.

Защита от охлаждения осуществляется посредством:

- одежды, изготовленной в соответствии с требованиями государственных стандартов.

- использования локальных источников тепла, обеспечивающие сохранение должного уровня общего и локального теплообмена организма.

- регламентации продолжительности непрерывного пребывания на холоде и продолжительности пребывания в помещении с комфортными условиями.

Таким образом, в настоящий момент рабочая зона полностью соответствует требованиям оптимальных микроклиматических условий.

### **Электромагнитное излучение радиочастотного диапазона**

При разработке и эксплуатации системы управление осуществляется через использование радиоаппаратуры, которая работает на частоте 2,4 Гц. По паспорту радиоаппаратура «FlySky FS i6» мощность ее выходного излучения менее 20 дБм (100 мВт).

Согласно ГОСТ 12.1.006-84 измерения напряженности или плотности потока энергии ЭМП допускается не проводить в случаях если: установка не работает в режиме излучения на открытый волновод, антенну или другой элемент, предназначенный для излучения ЭМП в окружающую среду, и ее номинальная мощность согласно паспортным данным не превышает [29]:

- 2,5 Вт - в диапазоне частот от 60 кГц до 3 МГц;
- 400 мВт - в диапазоне частот свыше 3 МГц до 30 МГц;
- 100 мВт - в диапазоне частот свыше 30 МГц до 300 ГГц.

В данном случае мощность излучения аппаратуры не превышает 100 мВт, а следовательно, нет необходимости проводить измерение напряженности или плотности потока энергии ЭМП. Таким образом, используемое оборудование не вызывает негативного влияния на организм человека.

### **Электрический ток**

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), помещение в котором производилась разработка системы по опасности электропоражения относится к помещениям без повышенной опасности. Это следует из того, что в помещении нет высокой влажности, токопроводящей пыли, высокой

температуры и возможности одновременного соприкосновения с заземленными предметами и металлическими корпусами оборудования. Во время нормального режима работы оборудования, опасность электропоражения крайне мала, однако, возможны аварийные режимы работы, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящегося под напряжением с заземленными конструкциями.

В соответствии с главой 1.7 ПУЭ для защиты от поражения электрическим током в нормальном режиме должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты:

- основная изоляция токоведущих частей;
- применение сверхнизкого (малого) напряжения.
- защитное заземление или зануление;
- автоматическое отключение питания;
- защитное электрическое разделение цепей;
- защитные ограждения (временные или стационарные);
- безопасное расположение токоведущих частей.

#### **4.3 Экологическая безопасность**

Объект исследования не оказывает воздействия на атмосферу и гидросферу. Отходы, возникающие при замене устаревших или неисправных частей системы, таких как литий полимерный аккумулятор, двигатель, сервоприводы, датчики, оказывают неблагоприятное воздействие на литосферу. Отработанное оборудование следует передать в компанию по переработке.

В соответствии с Приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 г. N 242 "Об утверждении федерального классификационного каталога отходов" литий полимерные отходы относятся II классу опасности - высокоопасные отходы.

Складирование отхода "Отходы литий-ионных аккумуляторов неповрежденных" осуществляется в производственную тару (коробку из

гофрированного картона) с целью сохранения их целостности и с последующей их передачей на размещение/утилизацию.

При накоплении отхода "Отходы литий-ионных аккумуляторов неповрежденных" запрещается [30]:

- накопление отходов в месте, не предназначенном складирования таких отходов;
- накопление отходов более 11 месяцев;
- превышение при накоплении отходов установленных нормативов образования отходов.

Также при создании системы используются печатные платы. Вышедшие из строя печатные платы следует утилизировать. Сложность утилизации печатных плат состоит в том, что их состав включает множество компонентов разных свойств, например, по плотности и электропроводности [31]. Для эффективного разделения на части используют два вида обработки:

- механическая;
- гидрометаллургическая.

Механическая утилизация снижает затраты на труд и включает этапы:

- измельчение ножами, вращающимися на высокой скорости, в контейнере;
- извлечение черных металлов с помощью сильных магнитов;
- передача плат в шаровую мельницу для получения порошка, просеивание;
- рециркуляция с помощью электростатики;
- повторное измельчение;
- пиролитическая переработка бесполезных компонентов.

Гидрометаллургия — выделение золота с контактным разъемом. Очистка проводится одним из следующих способов:

- растворение меди на подложках в кислоте,
- применение растворов с цианидом для получения электролитического осадка.



#### **4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Наиболее типичной чрезвычайной ситуацией техногенного характера, которая может возникнуть при разработке системы, является пожар. Он может возникнуть в следствии замыкания электропроводки, переразряда\перезарядки литий полимерных аккумуляторов, не соблюдению мер пожаробезопасности.

Согласно Федеральному закону «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», по пожарной и взрывопожарной опасности помещения производственного и складского назначения независимо от их функционального назначения подразделяются на следующие категории:

- повышенная взрывопожароопасность (А);
- взрывопожароопасность (Б);
- пожароопасность (В 1—В4);
- умеренная пожароопасность (Г);
- пониженная пожароопасность (Д).

Так как в помещении, в котором велась разработка системы, присутствуют лишь горючие и трудногорючие вещества и материалы (литий полимерный аккумуляторы), то помещение относится к категории Г (умеренная пожароопасность).

К противопожарным мероприятиям в помещении относят следующие мероприятия:

- помещение должно быть оборудовано: средствами тушения пожара, средствами связи, должна быть исправна электрическая проводка осветительных приборов и электрооборудования.
- каждый сотрудник должен знать место нахождения средств пожаротушения и средств связи, а также помнить номера телефонов для сообщения о пожаре и уметь пользоваться средствами пожаротушения.

Для предотвращения возникновения пожара необходимо проводить следующие профилактические работы, направленные на устранение возможных источников возникновения пожара:

- периодическая проверка проводки;

- отключение оборудования при покидании рабочего места;
- проведение с работниками инструктажа по пожарной безопасности.

Работник, в случае возникновения пожара или его признаков (задымление, запах горения или тления различных материалов, повышение температуры и т.п.) обязан [32]:

- немедленно сообщить об этом по телефону «01» в пожарную часть (при этом необходимо четко назвать адрес учреждения, место возникновения пожара, а также сообщить свою должность и фамилию);
- задействовать систему оповещения людей о пожаре, приступить самому и привлечь других лиц к эвакуации людей из здания в безопасное место согласно плану эвакуации;
- принять по возможности меры по тушению пожара имеющимися в учреждении средствами пожаротушения и сохранности материальных ценностей;
- организовать встречу пожарных подразделений;
- известить о пожаре руководителя организации или заменяющего его работника.

#### **Вывод к главе 4**

При выполнении раздела социальной безопасности были проанализированы и выявлены основные вредные и опасные факторы, которые могут возникать в процессе разработки и эксплуатации системы, такие как: движущиеся твердые объекты, повышенный уровень шума на рабочем месте, отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность рабочей зоны, наличие электромагнитных полей радиочастотного диапазона, повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека. Были описаны меры минимизации уровней воздействия данных факторов.

С точки зрения экологической безопасности было выявлено, что объект исследования не оказывает влияния на атмосферу и гидросферу, однако, при неправильной утилизации компонентов системы возможно оказание вредного воздействия на литосферу. Для предотвращения загрязнения среды были предложены мероприятия по утилизации отходов, а также способы их утилизации.

Произведен анализ возможных чрезвычайных ситуаций, возникновение которых наиболее вероятно при разработке и эксплуатации системы. Были разработаны превентивные меры по предупреждению возникновения чрезвычайных ситуаций, а также разработан порядок действий при возникновении чрезвычайных ситуаций.

## Заключение

В ходе работы была спроектирована структурная схема системы стабилизации беспилотного летательного аппарата самолетного типа по крену. Был выполнен подбор, монтаж и юстировка необходимого оборудования. Была получена математическая модель имеющегося беспилотника. Используя данную математическую модель, была проведено моделирование переходного процесса для определения оптимальных параметров ПИД-регулятора. Также было проведено конфигурирование микроконтроллера STM32 в графической среде STM32CubeMX, и его программирование на языке Си в Keil uVision.

В процессе испытаний работоспособности системы были выявлены особенности работы регулятора, такие как неблагоприятное воздействие интегральной составляющей при ветренной погоде: в следствии действия ветра происходит накопление интегральной составляющей, что влечет за собой увеличение инерциальности системы. Было решено уменьшить интегральный коэффициент, тем более что система изначально обладает астатизмом первого порядка. Так же был модифицирован алгоритм работы регулятора, а именно введено ограничение дифференциальной составляющей по принципу насыщения. Это позволило сделать систему более устойчивой в ветренную погоду. Также были выявлены трудности в работе с числами двойной точности на микроконтроллере STM32F3: встроенный блок FPU имеет разрядность в 32 бита, следовательно способен работать только с числами одинарной точности. Поэтому был модифицирован алгоритм. В результате доработок система показала свою стабильную работу в процессе полета самолета.

В дальнейшем планируется добавление контуров стабилизации по тангажу и рысканью, а также произвести управление центром масс аппарата.

## **Conclusion**

In the course of the work, a block diagram of the unmanned aerial vehicle's roll stabilization system was designed. The selection, installation and adjustment of the necessary equipment were made. A mathematical model of the existing drone was obtained. Based on this mathematical model, the transition process was simulated to determine the optimal parameters of the PID controller. Also, the STM32 microcontroller was configured using STM32CubeMX graphical environment, and programmed in Keil uVision.

During the performance testing of the system, features of the regulator were identified, such as the adverse effect of the integral component in windy weather: as a result of the wind, accumulation of the integral component occurs, which leads to an increase in the inertia of the system. It was decided to reduce the integral coefficient, especially since the system initially has astatism of the first order. The algorithm of the regulator's operation was also modified, namely, the limitation of the differential component was introduced according to the saturation principle. This allowed to make the system more stable in windy weather. Difficulties in working with double precision numbers on the STM32F3 microcontroller were also revealed: the onboard FPU has 32 bits, therefore it can work only with single precision numbers. Therefore, the algorithm has been modified. As a result of improvements, the system showed its stable operation during the flight of the aircraft.

In the future, it is planned to add stabilization contours in pitch and yaw, as well as control motion the center of mass of the dron.

## Список используемых источников

1. Воробьев В.Г. Автоматическое управление полетом самолетов: учеб. для вузов / В.Г. Воробьев, С.В. Кузнецов. – М.: Транспорт. 1995. – 448 с.
2. Части самолета: устройство и конструкция. Название деталей самолета. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aviationtoday.ru/poleznoe/chasti-samoleta-znachenie-ekspluatacii.html> – свободный (от 09.04.2019).
3. Ефимов В.В. Часть I. Основы аэродинамики и динамики полета летательных аппаратов: Учебное пособие. / В.В. Ефимов, М.Г. Ефимова. – М.: МГТУ ГА, 2012. – 64 с.
4. Тангаж. Угол тангажа. Тангаж самолета. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://avia.pro/blog/tangazh> – свободный (от 11.05.2019).
5. Устойчивость и управляемость самолета. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://izlov.ru/docs/100/index-12204.html> – свободный (от 12.05.2019).
6. Воробьев В.В. Системы управления летательных аппаратов: учебник для курсантов и слушателей вузов ВВС / В.В. Воробьев, А.М. Киселев, В.В. Поляков. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 203 с.
7. Техническая документация на микросхему LSM303DLHC: Ultra-compact high-performance eCompass module: 3D accelerometer and 3D magnetometer. Datasheet – production data.
8. Техническая документация на датчик L3GD20: MEMS motion sensor:three-axis digital output gyroscope. Datasheet – production data.
9. Keil  $\mu$ Vision. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cxem.net/software/keil.php> –свободный (от 22.05.2019).
10.  $\mu$ Vision IDE. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www2.keil.com/mdk5/uvision/> – свободный (от 23.05.2019).
11. Визуализация возможностей: графический генератор кода STM32CubeMX. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.compel.ru/lib/ne/2014/11/4-vizualizatsiya-vozmozhnostey-graficheskiy-generator-koda-stm32cubemx> – свободный (от 23.05.2019).

12. STM32CubeMX - STM32Cube initialization code generator – STMicroelectronics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html> – свободный (от 23.05.2019).

13. Основы работы протокола SPI. Хабстаб. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hubstub.ru/programming/62-osnovy-raboty-protokola-spi.html> – свободный (от 24.05.2019).

14. Интерфейс I2C и Arduino. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://soltau.ru/index.php/en/arduino/item/371-interfejs-i2c-i-Arduino> – свободный (от 24.05.2019).

15. Фильтр Маджвика / Хабр. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/en/post/255661/> – свободный (от 11.04.2019).

16. Выпускная работы бакалавра. «Универсальный датчик инерциальной навигации на микроконтроллере». Выполнил: П.А. Бурдин, под руководством: А.С. Груздев. СПбПУю Санкт-Петербург 2016.

17. Руководство пользователя на отладочную плату STM32 Discovery F3: Discovery kit with STM32F303VC MCU. UM1570 User manual.

18. Discrete-time PID Controller Implementation | [www.scilab.org](http://www.scilab.org). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scilab.org/discrete-time-pid-controller-implementation> – свободный (от 25.05.2019).

19. Скороспешкин В.Н. Автоматизированные информационно-управляющие системы: Курс лекций / В. Н. Скороспешкин. – Томск: ТПУ, 2018. – 90 с.

20. Все про широтно-импульсную модуляцию (ШИМ). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ledjournal.info/spravochnik/shirotno-impulsnaya-modulyaciya.html> – свободный (от 27.05.2019).

21. Трудовой кодекс Российской Федерации», от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).

22. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования/– Введ.1979-01-01.: ИПК Издательство стандартов, 2001.–9 с.
23. ГОСТ 12.0.003-2015/ Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация/– Введ. 2017-03-01.: Стандартиформ, 2016.–9 с.
24. ГОСТ 12.4.125-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства коллективной защиты работающих от воздействия механических факторов. Классификация/ – Введ. 1984-01-01.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 4 с.
25. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». – введ. 2003 – 06 – 30. – Москва Минздрав России, 2003. – 54 с.
26. ГОСТ ИСО 8995-2002. Принципы зрительной эргономики. Освещение рабочих систем внутри помещений/ – Введ. 2004-01-01.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 32 с.
27. ГОСТ Р 54350-2011. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний/ – Введ. 2012-07-01.: Стандартиформ, 2011. – 43 с.
28. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений/– Введ. 1986-03-31.–20 с.
29. ГОСТ Р 50829-95. Безопасность радиостанций, радиоэлектронной аппаратуры с использованием приемопередающей аппаратуры и их составных частей. Общие требования и методы испытаний/ – Введ. 1997-01-01.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 40 с.
30. Инструкция по обращению с отходами II класса опасности "Отходы литий-ионных аккумуляторов неповрежденных", Инструкция (форма) от 30 августа 2018 года. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/872816564> – свободный (от 05.06.2019).



31. Утилизация печатных плат. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fpk-service.ru/utilizaciya-plat.html> – свободный (от 05.06.2019).

32. Действия персонала при возникновении пожара | NFCOM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nfcom.ru/info/stati-o-pozharnoi-bezopasnosti/deistviya-personala-pri-vozniknovenii-pozhara> – свободный (от 05.06.2019).

## Приложение А

(обязательное)

### Код библиотеки, реализующей алгоритм ПИД-регулятора

```
#include "PID.h"

float ku1;          //дискретный параметр при выходе ПИД-
регулятора на к-1 шаге
float ku2;          //дискретный параметр при выходе ПИД-
регулятора на к-2 шаге
float ke0;          //дискретный параметр при сигнале
рассогласования на к-ом шаге
float ke1;          //дискретный параметр при сигнале
рассогласования на к-1 шаге
float ke2;          //дискретный параметр при сигнале
рассогласования на к-2 шаге

float PIDmax;       //максимальное значение регулятора
float PIDmin;       //минимальное значение регулятора
int PID_SetPoint;   //уставка ПИД-регулятора

float PID_Error[3]; //ошибка рассогласования
float PID_Out[3];   //выход ПИД-регулятора

void PID_Ini(float Kp, float Ki, float Kd, float N, float PidMin,
float PidMax, float dt, int SetPoint){
    PIDmax = PidMax;
    PIDmin = PidMin;
    PID_SetPoint = SetPoint;

    ku1 = (2+N*dt)/(1+N*dt);
    ku2 = -1/(1+N*dt);
    ke0 = (Kp*(1+N*dt)+Ki*dt*(1+N*dt)+Kd*N)/(1+N*dt);
    ke1 = -(Kp*(2+N*dt)+Ki*dt+2*Kd*N)/(1+N*dt);
    ke2 = (Kp+Kd*N)/(1+N*dt);
}

float PID_control(float angle){ //уставку будем задавать
    через настройку
    for (int i = 2; i > 0; i--){
        PID_Error[i]=PID_Error[i-1];
        PID_Out[i]=PID_Out[i-1];
    }
    PID_Error[0] = PID_SetPoint - angle; //посчитаем ошибку
    PID_Out[0] = ku1*PID_Out[1] + ku2*PID_Out[2] +
    ke0*PID_Error[0] + ke1*PID_Error[1] + ke2*PID_Error[2];
    if (PID_Out[0] > PIDmax) PID_Out[0] = PIDmax; // limit to
    DAC or PWM range
    if (PID_Out[0] < PIDmin) PID_Out[0] = PIDmin;
    return PID_Out[0];
}
```

## Приложение А

(конец)

```
int PWMGen(float Signal){  
    float tmp = 1500 + 0.08889*Signal;  
    /*if (Signal >= 4500) return 1900;  
    else if (Signal <= -4500) return 1100;  
    else*/ return tmp; //происходит ковертация так как  
математическая модель была создана с использование входных  
данных диапазона (-4500;4500) а ШИМ сигнал (1100;1900)  
}
```