

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет компьютерных систем и сетей

Кафедра электронных вычислительных машин

ОТЧЕТ
по преддипломной практике

Студент

А.В. Деркач

Руководитель

Е.В. Горячко

Консультант от кафедры ЭВМ

Ю.А. Луцик

Нормоконтролер

Е.Е. Клинецвич

МИНСК 2023

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет компьютерных систем и сетей

Кафедра электронных вычислительных машин

К ЗАЩИТЕ ДОПУСТИТЬ
Зав. каф. ЭВМ
_____ Б.В. Никульшин

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту
на тему
АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «БЕСПИЛОТНЫЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ С ДИСТАНЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ»

БГУИР ДП 1–40 02 01 01 022 ПЗ

Студент	А.В. Деркач
Руководитель	Ю.А. Луцик
Консультанты:	
от кафедры ЭВМ	Ю.А. Луцик
по экономической части	В.Г. Горовой
Нормоконтролер	Е.Е. Клинецвич
Рецензент	

МИНСК 2023

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет: КСиС. Кафедра: ЭВМ.

Специальность: 40 02 01 «Вычислительные машины, системы и сети».

Специализация: 40 02 01-01 «Проектирование и применение локальных компьютерных сетей».

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭВМ

_____ Б.В. Никульшин

« ____ » _____ 2023 г.

ЗАДАНИЕ

по дипломному проекту студента

Деркач Анжелики Валерьевны

1 Тема проекта: Аппаратно-программный комплекс «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением» – утверждена приказом по университету от 24 марта 2023 г. № 743-с.

2 Срок сдачи студентом законченного проекта: 1 июня 2023 г.

3 Исходные данные к проекту:

3.1 Тип управления устройством: дистанционно, по радиосвязи.

3.2 Количество двигателей устройства: 4.

3.3 Обязательные модули устройства: гироскоп, акселерометр, модуль радиопередачи.

3.4 Среда разработки: Arduino IDE.

3.5 Языки программирования: AVR C.

3.6 Модель динамики полета летательных аппаратов.

4 Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

Введение. 1. Обзор литературы. 2. Разработка структурной схемы. 3. Разработка функциональной схемы. 4. Разработка принципиальной схемы. 5. Моделирование. 6. Руководство пользователя. 7. Технико-экономическое обоснование разработки и реализации на рынке аппаратно-программного комплекса «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением». Заключение. Список использованных источников. Приложения.

5 Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

5.1 Вводный плакат. Плакат.

5.2 Аппаратно-программный комплекс «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением». Схема электрическая структурная.

5.3 Аппаратно-программный комплекс «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением». Схема электрическая функциональная.

5.4 Аппаратно-программный комплекс «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением». Схема электрическая принципиальная.

5.5 Аппаратно-программный комплекс «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением». Схема программы.

5.6 Заключительный плакат. Плакат.

6 Содержание задания по экономической части: «Технико-экономическое обоснование разработки и реализации на рынке аппаратно-программного комплекса «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением».

ЗАДАНИЕ ВЫДАЛ

В.Г. Горовой

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов дипломного проекта	Объем этапа, %	Срок выполнения этапа	Примечания
Подбор и изучение литературы. Сравнение аналогов. Уточнение задания на ДП	10	23.03 – 30.03	
Разработка структурной схемы	15	30.03 – 08.04	
Разработка функциональной схемы	25	08.04 – 19.04	
Разработка принципиальной схемы	20	19.04 – 08.05	
Моделирование	10	08.05 – 15.05	
Расчет экономической эффективности	5	15.05 – 20.05	
Оформление пояснительной записки	15	20.05 – 30.05	

Дата выдачи задания: 23.03.2023

Руководитель

Ю.А. Луцик

ЗАДАНИЕ ПРИНЯЛ К ИСПОЛНЕНИЮ

А.В. Деркач

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	9
1.1 Обзор и анализ существующих аналогов	9
1.1.1 Мини-дрон MJX BUGS 7 4K V2	9
1.1.2 Мини-дрон DJI Mavic Mini 2	11
1.1.3 Мини-дрон Syma X56W-P	12
1.2 Состав устройства	14
1.3 Обзор микроконтроллеров	14
1.4 Обзор элементной базы	18
1.4.1 Обзор модулей радиопередачи	18
1.4.2 Обзор модулей гироскопа и акселерометра	21
1.4.3 Обзор барометров	23
1.4.4 Обзор модулей GPS	25
1.4.5 Обзор двигателей	28
1.4.6 Обзор регуляторов оборотов двигателей	30
2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ	32
2.1 Описание основных блоков устройства	32
2.2 Блок обработки информации контроллера полёта	32
2.3 Блок определения ориентации в пространстве	33
2.4 Блок определения высоты	33
2.5 Блок приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта	34
2.6 Блок индикации	34
2.7 Блок управления двигателями	35
2.8 Блок питания контроллера полёта	35
2.9 Блок обработки информации устройства управления	35
2.10 Блок управления летательным аппаратом	36
2.11 Блок взаимодействия с настройками управления	36
2.12 Блок приёма и передачи радиосигнала устройства управления	37
2.13 Блок отображения информации	37
2.14 Блок питания устройства управления	37
3 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ	38
3.1 Блоки летательного устройства	38
3.1.1 Блок обработки информации контроллера полёта	38
3.1.2 Блок определения ориентации в пространстве	40
3.1.3 Блок определения высоты	41
3.1.4 Блок приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта	42
3.1.5 Блок индикации	43
3.1.6 Блок управления двигателями	44
3.1.7 Блок питания контроллера полёта	46
3.2 Блоки устройства управления	46
3.2.1 Блок обработки информации устройства управления	46
3.2.2 Блок управления летательным аппаратом	48

3.2.3 Блок взаимодействия с настройками управления	48
3.2.4 Блок приёма и передачи радиосигнала устройства управления	48
3.2.5 Блок отображения информации	49
3.2.6 Блок питания устройства управления.....	49
3.3 Интерфейсы и протоколы	50
3.3.1 Интерфейс I2C.....	50
3.3.2 Интерфейс SPI.....	52
3.3.3 Интерфейс UART.....	53
3.3.4 Протокол радиопередачи ESB.....	54
3.3.5 GFSK модуляция.....	56
3.3.6 Широтно-импульсная модуляция	56
7 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ НА РЫНКЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ С ДИСТАНЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ»	58
7.1 Характеристика аппаратно-программного комплекса.....	58
7.2 Расчет экономического эффекта от производства аппаратно- программного комплекса	58
7.3 Расчет инвестиций в проектирование и производство аппаратно- программного комплекса	63
7.4 Расчет показателей экономической эффективности инвестиций в проектирование и производство аппаратно-программного комплекса	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	68
ПРИЛОЖЕНИЕ А	73
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	74
ПРИЛОЖЕНИЕ В	75

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) заполнили большую область сфер нашей жизнедеятельности: военные, космические, медицинские, логистические и другие. В научной сфере продолжают вести работу над модернизацией существующих летательных аппаратов и разработкой новых моделей для более эффективного выполнения поставленных задач. Темой дипломного проекта является разработка аппаратно-программного комплекса «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением».

Стимулом к развитию беспилотной авиации во всем мире послужила потребность в легких, относительно дешевых летательных аппаратах, обладающих высокими характеристиками манёвренности и способных выполнять широкий круг задач. Беспилотные аппараты успешно применяются в ходе военных операций по всему миру, и при этом они так же успешно выполняют задачи гражданского назначения. Основным преимуществом БПЛА является то, что оператор не рискует своей жизнью, недостатком является уязвимость систем дистанционного управления, что особенно важно для устройств военного назначения. Основными сферами применения летательных аппаратов являются: оборонная промышленность, сельское хозяйство, видеосъемка, воздушные доставки, спасательные операции, научно-исследовательские цели, строительство [2].

В данном дипломном проекте будет рассмотрен БПЛА, представляющий платформу с четырьмя роторами (квадрокоптер). Вращающиеся пропеллеры квадрокоптера создают вертикальную силу тяги. Диагонально расположенные пропеллеры вращаются в разные стороны и обеспечивают компенсацию создаваемых пропеллерами противомоментов. По сравнению с устройствами вертолетного типа, квадрокоптеры обладают рядом преимуществ, таких как: надежность и простота конструкции, большая стабильность, компактность и маневренность, малая взлетная масса при существенной массе полезной нагрузки.

Квадрокоптер является сложным устройством, которое трудно классифицировать, так как они имеют очень разные характеристики. Это разнообразие происходит от обилия конфигураций и компонентов БПЛА. Производители пока не ограничены никакими стандартами. В результате сегодня отсутствуют требования со стороны авиационных регуляторов о том, как летательный аппарат должен быть оснащен. При всем многообразии БПЛА условно можно разделить на 4 группы: мини, маленькие, средние и тяжелые. Компоненты делятся на основные и дополнительные. Основные компоненты включают в себя полетные контроллеры, систему питания, регуляторы и двигатели. Дополнительные компоненты определяются в зависимости от специализации устройства.

Одна из базовых задач управления БПЛА – это обеспечение стабильности полета. При пилотировании присутствуют внешние воздействия, основные из них это: порывы ветра, резкие перепады давления,

турбулентные потоки, радиопомехи, магнитные аномалии. Полетный контроллер – один из наиболее важных компонентов, используемых в БПЛА, который влияет на его полетное поведение. Контроллер обеспечивает стабильность и точность полета, он может корректировать мощность двигателей, а также изменять скорость или направление движения устройства.

Полетный контроллер представляет собой микроконтроллер, который управляет всей системой БПЛА, а также включает дополнительные датчики для определения положения в пространстве, такие, как: гироскоп, акселерометр, магнитометр, барометр, система GPS и другие. Контроллер также подключается к передатчику радиопередачи, если летательный аппарат управляется оператором. Полетный контроллер работает на основе программного обеспечения, в котором используют различные виды регуляторов [3].

В настоящее время наиболее часто встречающимся регулятором при построении квадрокоптера является пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор). Причинами столь высокой популярности ПИД-регулятора являются простота построения и промышленного использования, изученность свойств и принципа действия, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость. Существует достаточно много методов настройки ПИД-регулятора для управления параметрами устройства, однако, традиционный метод регулирования не может обеспечить приемлемое качество управления при меняющихся характеристиках материалов и среднем качестве используемого оборудования [4]. Чем лучше подобраны параметры регуляторов и выше тактовая частота обработки данных, тем выше точность и стабильность управления.

Целью данного дипломного проекта является разработка и реализация аппаратно-программного комплекса «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением» с открытой аппаратной и программной частями. Такая концепция превращает БПЛА в конструктор. В зависимости от своих нужд пользователь может менять параметры управления, полетные функции, добавлять датчики или же изменять программное обеспечение.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие задачи:

- разработка структуры будущего аппаратного и программного обеспечения;
- выбор и обоснование элементной базы устройства, учитывая их надежность, стоимость, функциональность и размеры;
- проектирование и разработка контроллера полета, представленного в виде платы микроконтроллера и набора датчиков для сбора информации;
- разработка программной части для корректной обработки информации и осуществления связи между элементами;
- тестирование и проведение испытаний разработанной системы с целью проверки правильности сборки и исключения сбоев при эксплуатации устройства.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Обзор и анализ существующих аналогов

Одним из основных и начальных этапов разработки устройства является определение перечня необходимых элементов и выбор конкретных моделей. Чтобы сделать правильный выбор, необходимо проанализировать недостатки и преимущества устройств, представленных на рынке.

Далеко не все имеют представление, что такое мини дроны, каким набором функций они обладают и на что способны в техническом плане. Обычно размер этих летательных аппаратов находится в диапазоне от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров, что позволяет активно эксплуатировать их в небольших помещениях. Далее будут рассмотрены модели, имеющие схожий функционал с разрабатываем устройством.

1.1.1 Мини-дрон MJX BUGS 7 4K V2

Радиоуправляемый дрон MJX Bugs 7 с камерой 4K MJX-B7 – это новая модель дронов от компании MJX с мощными бесколлекторными моторами и Ultra HD видеочкамерой 4K [5]. Дрон представляет собой небольшой БПЛА для любительских и профессиональных фото и видеосъемок и может летать на расстоянии до 300 метров от пульта управления. На рисунке 1.1 представлено изображение данного дрона.



Рисунок 1.1 – Мини-дрон MJX BUGS 7 4K V2 в двух состояниях:
а – рабочее; б – сложенное

MJX BUGS 7 4K V2 оснащен профессиональными и мощными бесколлекторными моторами с индивидуальными электронными регуляторами скорости. Автоматическая система блокировки моторов, установленная на ESC, не только эффективно защищает их от преждевременного выхода из строя, но также обеспечивает безопасность полета.

Дрон имеет компактный размер и весит всего 249 грамм, что делает его легким и маневренным. Кроме того, он имеет функцию стабилизации камеры, которая позволяет получать более четкие и плавные видео и фото. Также MJX BUGS 7 4K V2 оснащен двухосевым гироскопом, который обеспечивает стабильный полет дрона и позволяет легко управлять им даже в сложных условиях.

На MJX BUGS 7 4K V2 присутствует система оптического позиционирования (Vision Sensor), позволяющая дрону удерживать позицию в дополнение или же в отсутствие сигнала GPS, а также делающей приземление более плавным и точным. GPS позволяет дрону реализовывать такие популярные современные функции, как «Возврат домой», «Полет по маршруту», «Следуй за мной», «Облет цели».

Летает дрон на аккумуляторе Li-Po 2S 1500 mAh, что дает ему примерно 15 минут полетного времени.

Основные характеристики данного устройства представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики дрона MJX BUGS 7 4K V2

Характеристики	MJX BUGS 7 4K V2
Максимальная высота взлета	120 м
Максимальное время полета	15 мин
Максимальная скорость полета	32 км/ч
Максимальная скорость подъема	3 м/с
Максимальная скорость снижения	2 м/с
Размер рамы	175 мм
Размеры дрона	в сложенном виде – 140 x 75 x 55 мм, в разложенном виде – 240 x 235 x 55 мм
Вес	245 г
Рабочая температура	от 0 °C до 40 °C
Двигатели	бесколлекторные, 1306 2750KV
Встроенные датчики	GPS, оптический датчик, барометр
Стоимость	180\$

К недостаткам MJX BUGS 7 4K V2 можно отнести:

1. Время работы батареи. Автономность данной модели составляет всего 15 минут.
2. При низком заряде дрон перестает корректно выполнять команды, полученные с пульта управления.

3. Плохо удерживает позицию при наличии сильного ветра.
4. Иногда некорректно обрабатывает команда «Вернуться домой», когда пропадает связь с пультом управления.
5. Качество сборки оставляет желать лучшего.
6. Отсутствует управление поворотом камеры.
7. Долгая зарядка батареи.

1.1.2 Мини-дрон DJI Mavic Mini 2

DJI Mavic Mini 2 – это любительская модель ультракомпактного класса, созданная для фото и видеосъемки от компании DJI [6]. Установленная на крохотном, но очень эффективном стабилизирующем подвесе камера может снимать качественное 4К-видео и 12-мегапиксельные фото. Данная модель является улучшенной версией DJI Mavic Mini и предлагает более высокое качество видео и фотографий.

На рисунке 1.2 представлено изображение данного дрона в двух состояниях.



Рисунок 1.2 – Мини-дрон DJI Mavic Mini 2 в двух состояниях:
а – рабочее; *б* – сложенное

При своем небольшом весе DJI Mini 2 предлагает удивительную производительность. Новейшая технология OcuSync 2.0 обеспечивает стабильную и бесперебойную передачу данных между пультом дистанционного управления и дроном. Дальность передачи сигнала составляет до 10 км. Встроенные двигатели позволяют находиться в воздухе до 31 минуты, разгоняться до 57.6 км/ч, причем с моментальным ускорением, а еще дрон выдерживает порывы ветра до 10 метров в секунду.

Управляется DJI Mini 2 с помощью пульта управления и приложения DJI Fly, доступное для скачивания на устройства на базе iOS и Android.

Встроенный датчик GPS обеспечивает связь с пультом через мобильное приложение, где в режиме реального времени можно отслеживать нахождение дрона, даже если он удалился на максимальное расстояние. В нижней части

корпуса присутствует два датчика, которые отвечают за безопасное приземление устройства. При снижении они позволяют дрону определить расстояние до земли и анализируют рельеф поверхности для обеспечения более плавной и мягкой посадки. Еще одна технология для безопасного полета, отвечающая за своевременное возвращение на место взлета, так и называется – «Возврат домой».

Основные характеристики данного устройства представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики дрона DJI Mavic Mini 2

Характеристики	DJI Mavic Mini 2
Максимальная высота взлета	2000 м
Максимальное время полета	31 мин
Максимальная скорость полета	16 м/с
Максимальная скорость подъема	5 м/с
Максимальная скорость снижения	3.5 м/с
Рабочая частота	2.4 – 2.4835 ГГц
Размер рамы	213 мм
Размеры квадрокоптера	в сложенном виде – 138 x 81 x 58 мм, в разложенном виде – 245 x 289 x 56 мм
Вес	249 г
Рабочая температура	от 0 °С до 40 °С
Двигатели	бесколлекторные, 1408 3000KV
Стоимость	940\$

К недостаткам DJI Mavic Mini 2 можно отнести:

1. Время работы батареи. Автономность данной модели составляет всего 31 минуту, чего недостаточно для устройства высокой ценовой категории.
2. Высокая стоимость. Данная модель находится в одной из высших ценовых категорий данного класса дронов, из-за чего не все могут позволить его к покупке.
3. Нет функции определения препятствий, из-за чего необходимо самостоятельно отслеживать положение дрона.
4. Разъемы открыты, что может привести к попаданию туда воды и грязи.
5. Отсутствие функции следования за объектом, которая присутствует в других устройствах более бюджетного класса.

1.1.3 Мини-дрон Syma X56W-P

Одним из самых простых и миниатюрных БПЛА является мини-дрон Syma X56W-P (или X56W PRO) – доработанная модификация популярного Suma X56W [7].

Изображение данного квадрокоптера представлено на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Мини-дрон Syma X56W-P

На Syma X56W-P установлены моторы коллекторного типа с передачей крутящего момента через редуктор закрытого типа.

Дрон оснащен 1 Мп HD камерой, установленной на корпусе без подвеса. Полет от первого лица для этой модели реализован посредством Wi-Fi на частоте 2.4 ГГц. Вывод картинки в режиме реального времени осуществляется через мобильное приложение «Syma Fly» (для IOS/Android). Для комфортного полёта требуется свободная от помех зона, и расстояние удаления от сопряжённого смартфона не далее 10 – 15 метров. В противном случае отрицательное влияние задержки сводит на нет дальнейшее пилотирование. Разрешение видеопотока 720 p.

Главная отличительная особенность представленной модели – это наличие оптического сенсора, благодаря которому обеспечивается позиционирование дрона. Работает датчик в паре с барометром, посредством которого реализована функция удержания высоты. Благодаря функции «План полета» Syma X56W-P может летать по нарисованному маршруту.

Основные характеристики данного устройства представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристики квадрокоптера Syma X56W-P

Характеристики	Syma LH-X56
1	2
Максимальная высота взлета	30 м
Максимальное время полета	15 мин
Максимальная скорость полета	4 м/с
Максимальная скорость подъема	1 м/с
Максимальная скорость снижения	1 м/с
Рабочая частота	2.4 ГГц
Радиус соединения	80 м
Размеры квадрокоптера	355 x 355 x 50 мм

Продолжение таблицы 1.3

1	2
Вес	157 г
Рабочая температура	от 0 °С до 40 °С
Двигатели	коллекторные
Стоимость	70\$

Так как устройство бюджетное и не предназначено для выполнения особых задач, то ему присуще все недостатки бюджетных устройств. Основные из них: малое время работы, дешевые материалы, низкая скорость и радиус связи, отсутствие популярных функций.

1.2 Состав устройства

Как сказано ранее, разрабатываемое микропроцессорное устройство представляет собой мини БПЛА, который выполняет функции полета и управляется посредством радиосигнала, а также информирует пользователя об измеряемых параметрах. Для решения этих задач в состав устройства должны входить:

- микроконтроллер;
- модуль радиопередачи;
- гироскоп;
- акселерометр;
- барометр;
- двигатели;
- регуляторы оборотов двигателей;
- аккумуляторы;
- другие устройства контроля и управления.

1.3 Обзор микроконтроллеров

Управление полетом и всеми датчиками дрона осуществляется при помощи контроллера полета, основным элементом которого является микроконтроллер. Микроконтроллер – это микроэлектронное программируемое устройство, предназначенное для получения информации и передачи этой информации тем устройствам, которые ее обработают, а также управления этими устройствами и выполнения простейших арифметических операций. Микроконтроллеры выпускают десятки компаний, причем производятся не только современные 32-битные микроконтроллеры, но и 16, и даже 8-битные (как i8051 и аналоги). Внутри каждого семейства часто можно встретить почти одинаковые модели, различающиеся скоростью работы центрального процессора (ЦПУ) и объемом памяти.

Для сравнения был выбран микроконтроллер ATmega328P-AU и аналоги других производителей. Результаты сравнения приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнение микроконтроллеров

Параметры сравнения	MEGA328P-AU	STM32F103	ESP32-D0WDQ6
Архитектура	AVR	ARM Cortex-M3	Xtensa Dual-Core LX6
Количество входов/выходов	23	до 80	до 34
Тактовая частота	20 МГц	до 72 МГц	до 240 МГц
Flash-память	32 Кб	до 512 Кб	до 4 Мб
SRAM-память	2 Кб	до 64 Кб	до 520 Кб
Количество ядер	1	1	2
Разрядность	8 бит	32 бит	32 бит
ШИМ-каналы	6	до 15	до 16
Интерфейсы	SPI, I2C, UART	SPI, I2C, UART, CAN, USB, Ethernet	SPI, I2C, UART, CAN, Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth
Рабочая температура	от -40 до +85 °С	от -40 до +85 °С	от -40 до +85 °С
Размеры	7 мм × 7 мм	10 мм × 10 мм	6 мм × 6 мм

Микроконтроллер ATmega328P-AU – это компактная модель 8-битного микроконтроллера, которая создана на базе *riSoPower AVR RISC* от компании ATMEL. Данный микроконтроллер имеет объем FLASH-памяти в 32 Кб, объем EEPROM 1 Кб и RAM 2 Кб. Он работает на тактовой частоте до 20 МГц, что позволяет выполнять сложные вычисления и обработку данных.

Несмотря на малые размеры, в устройстве достаточно обширный интерфейс и 23 универсальных порта ввода-вывода. ATmega328P-AU поддерживает различные протоколы связи, включая UART, SPI и I2C, что обеспечивает универсальность в подключении к другим устройствам и системам. Питание микроконтроллера происходит от источника в 1.8 – 5.5 В, а широкий диапазон рабочих температур от -40 до +85 °С в сочетании с малыми размерами и низкой стоимостью, дает широкие возможности для использования в самых различных роботизированных устройствах.

Микроконтроллер ATmega328P-AU может быть запрограммирован и отлажен через стандартный интерфейс программирования ISP (*In-System Programming*), а также имеет Bootloader, что делает его удобным для разработки и тестирования проектов.

Микроконтроллеры ATMEL AVR применяются в классической линейке устройств Arduino, поэтому к достоинствам можно отнести низкий порог вхождения – удобная кроссплатформенная интегрированная среда разработки, используемые в библиотеках высокоуровневые языки программирования. Все это существенно облегчает работу с микроконтроллером и делает его удобным как для новичков, так и для опытных разработчиков, что является наиболее существенным достоинством, так как концепция открытой

аппаратной и программной частей предполагает, что пользователь без специализированных навыков должен справиться с настройкой и усовершенствованием устройства.

Изображение микроконтроллера представлено на рисунке 1.4.

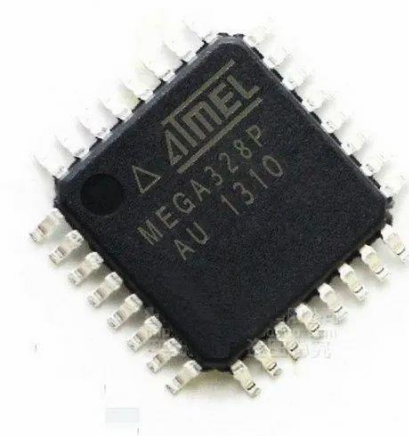


Рисунок 1.4 – Микроконтроллер ATmega328P-AU

Микроконтроллер семейства STM32F10x: серии STM32F103 является 32-битным микроконтроллером, разработанным компанией STMicroelectronics на основе ядра ARM Cortex-M3 и работает на тактовой частоте до 72 МГц, что дает ему одну из лучших в классе 32-битных микроконтроллеров производительность.

STM32F103 имеет встроенную FLASH-память до 512 Кб и SRAM-память объемом до 64 Кб, а также предоставляет широкие возможности для периферийных устройств так как поддерживает много интерфейсов: USB, CAN, I2C, SPI, UART, ADC и другие.

Помимо высокой производительности, микроконтроллер отличается низким энергопотреблением. Потребление энергии зависит от режима работы микроконтроллера. В активном режиме STM32F103 потребляет от 6 мА до 50 мА при частоте 72 МГц и выполнении программ из FLASH-памяти. Для управления потреблением энергии в STM32F103 предусмотрены различные механизмы, такие как механизмы снижения частоты ядра, динамическое управление напряжением ядра и автоматическое переключение режимов питания. В целом, микроконтроллер идеально подходит для проектов с батарейным питанием и может быть использован с ограниченным бюджетом энергопотребления.

К главным минусам микроконтроллера можно отнести:

1. Высокая сложность. Использование STM32F103 может быть сложным для начинающих разработчиков, так как он имеет множество интерфейсов и многоуровневую архитектуру.

2. Высокая стоимость. Хотя STM32F103 имеет множество преимуществ, его стоимость выше, чем у других производителей.

Изображение микроконтроллера STM32F103 представлено на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Микроконтроллер STM32F103

ESP32-D0WDQ6 - это микроконтроллер, разработанный компанией Espressif Systems на основе архитектуры Xtensa LX6. Он представляет собой двухъядерный процессор с тактовой частотой до 240 МГц, который обеспечивает высокую производительность и низкое энергопотребление.

Микроконтроллер имеет встроенный Wi-Fi и Bluetooth, что делает его идеальным для различных приложений, связанных с Интернетом вещей (IoT), таких как умный дом, автоматизация промышленных процессов и т.д. Кроме того, устройство имеет встроенную память Flash объемом до 4 Мб, а также 520 Кб RAM.

ESP32-D0WDQ6 имеет множество периферийных интерфейсов, таких как SPI, I2C, UART, ADC, что позволяет подключать к нему различные датчики и устройства. Устройство также имеет встроенный USB-контроллер, который обеспечивает поддержку USB-устройств и USB-хоста.

В целом, ESP32-D0WDQ6 является мощным и гибким микроконтроллером, который обеспечивает высокую производительность и множество функций для различных приложений, связанных с IoT.

К главным недостаткам микроконтроллера можно отнести:

1. Низкий уровень энергоэффективности. Микроконтроллер ESP32-D0WDQ6 потребляет довольно много энергии, что может ограничивать его использование в приложениях, где важна низкая энергопотребляемость.

2. Высокая стоимость. ESP32-D0WDQ6 является достаточно дорогим микроконтроллером, что увеличивает стоимость проектов, в которых он используется.

3. Сложность настройки. Настройка микроконтроллера ESP32-D0WDQ6 может быть сложной и требует определенных навыков, что может оказаться проблемой для начинающих пользователей.

На рисунке 1.6 представлено изображение микроконтроллера ESP32-D0WDQ6.



Рисунок 1.6 – Микроконтроллер ESP32-D0WDQ6

Для получения более подробной информации о рассмотренных микроконтроллерах использовалась техническая спецификация [9, 10, 11, 13] и источники [8, 12].

После рассмотрения характеристик микроконтроллеров видно, что ESP32-D0WDQ6 имеет наилучшие параметры при маленьких размерах. Микроконтроллер является двухъядерным, с разрядностью 32 бит, и работает на тактовой частоте до 240 МГц, чем превосходит своих аналогов. Также микроконтроллер имеет хороший запас ОЗУ и флэш-памяти из-за чего подходит для реализации более сложных проектов.

Модель MEGA328P-AU является самой простой, из рассмотренных, и подходит для реализации несложных проектов, а также является наиболее подходящей для начинающих пользователей. Микроконтроллер STM32F103 представляет собой нечто среднее между двумя другими.

1.4 Обзор элементной базы

1.4.1 Обзор модулей радиопередачи

Для осуществления связи между летательным устройством и пультом управления, используются модули радиопередачи. Передача радиосигнала очень важна для контроля и управления дроном, а также для получения полезной информации в режиме реального времени. Существуют модули с однонаправленной и двунаправленной передачей радиосигнала.

Для сравнения были выбраны радиомодули NRF24L01, HC-12 и ESP8266 с двунаправленной передачей данных, что позволит обмениваться данными, как от устройства управления к дрону, так и передавать информацию, полученную с дрона, на устройство управления.

Ниже, в таблице 1.5, приведены сравнительные характеристики рассматриваемых радиомодулей.

Таблица 1.5 – Сравнение модулей радиопередачи

Параметры сравнения	NRF24L01	HC-12
Производитель	Nordic Semiconductor	HopeRF
Частота радиосигнала	2.4 ГГц	433 МГц, 868 МГц
Напряжение питания	1.9 – 3.6 В	3.2 – 5.5 В
Потребляемый ток	до 14 мА	до 100 мА
Рабочая температура	от -40 до +85 °С	от -40 до +85 °С
Скорость приёма/передачи данных	до 2 Мбит/с	до 9.6 Кбит/с
Расстояние приёма/передачи	до 100 м без внешней антенны / до 1 км с внешней антенной	до 1 км
Интерфейс	SPI	UART
Поддержка режима энергосбережения	Да	Да
Поддержка множества устройств	Да	Да
Количество радиоканалов	126	100
Тип модуляции	GFSK	FSK
Размеры	29 мм × 15 мм	27.8 мм × 14.4 мм

Одни из самых популярных микросхем приёмопередатчиков – это NRF24L01. Высокую популярность они получили за счёт сочетания низкой цены, относительно небольшого энергопотребления, простоты работы с ними и высокой гибкостью при построении сетей различных топологий и сложности. NRF24L01 – это высокоинтегрированная микросхема с пониженным потреблением энергии и скоростью передачи до 2 Мбит/с для диапазона 2.4 ГГц, которая подключается к микроконтроллеру с помощью SPI-интерфейса и поддерживает 126 радиоканалов. При помощи модуля можно объединить до семи приборов в одну общую радиосеть. В этом случае один из модулей будет выступать в роли ведущего, остальные – ведомые.

Модуль NRF24L01 (Gaussian Frequency Shift Keying) использует GFSK модуляцию – это тип цифровой модуляции, который использует гауссово сглаживание (или фильтрацию) на смещение частоты для передачи цифровых данных. Фильтрация сигнала передатчика GFSK приводит к сглаживанию спектра, что означает, что его спектральная плотность находится в пределах более узкой полосы частот, чем при использовании других форм модуляции. Это позволяет более эффективно использовать радиочастотный канал и обеспечивает более надежную передачу данных с меньшей вероятностью ошибок при низкой скорости передачи.

Модули бывают разных габаритов, с печатной антенной, керамической или внешней, с усилителем или без. На плате может быть стабилизатор питания на 3.3 В, может и не быть. На рисунке 1.7 приведены наиболее популярные модели радиомодулей NRF24L01.

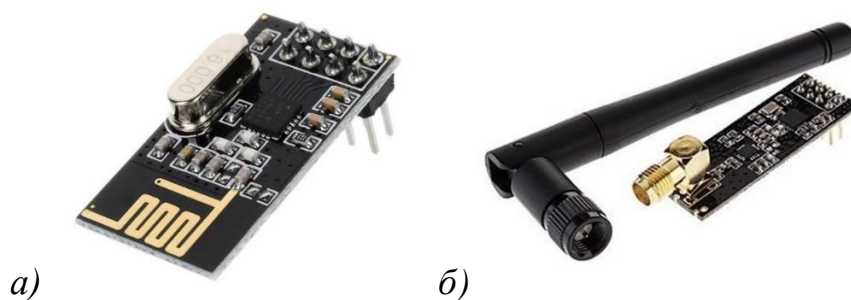


Рисунок 1.7 – Радиомодуль NRF24L01: *а* – без внешней антенны, *б* – с внешней SMA антенной

НС-12 – приемопередающий модуль связи на базе чипа SI4482, который может использоваться для беспроводной связи между устройствами на расстоянии до 1 км. Модуль использует частоту 433 или 868 МГц и имеет максимальную скорость передачи данных до 9.6 Кбит/с. НС-12 поддерживает несколько режимов работы, включая режим сна, режим передачи данных и режим настройки.

Модуль имеет 100 радиоканалов, которые могут быть использованы для обеспечения безопасности передачи данных и снижения влияния помех. Также в модуле есть встроенная антенна, но для повышения качества связи можно использовать внешнюю антенну.

НС-12 работает с помощью простого UART интерфейса, что делает его легко интегрируемым с микроконтроллерами и другими устройствами. Все настройки модуля могут быть изменены с помощью AT-команд, что упрощает процесс настройки и интеграции. В модуле используется модуляция частотной/частотно-сдвиговой ключевой (FSK) – это метод модуляции, при котором информационный сигнал изменяет частоту несущей в зависимости от состояния модулирующего сигнала.

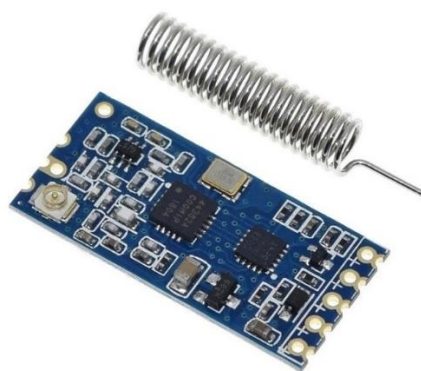


Рисунок 1.8 – Радиомодуль НС-12

Для получения информации о данных модулях использовалась техническая спецификация [14, 16] и источники [15, 17].

Как видно из сравнения характеристик и особенностей работы радиомодулей, модель NRF24L01 превосходит радиомодуль HC-12 по таким важным параметрам, как скорость передачи, количество радиоканалов и рабочая частота. Использование NRF24L01 также упростит работу пользователя с радиомодулем из-за его популярности и простоты использования.

1.4.2 Обзор модулей гироскопа и акселерометра

Гироскоп и акселерометр – это инерционные датчики, которые используются в БПЛА для измерения угловых скоростей и ускорений соответственно. Гироскоп позволяет определить угловые скорости вокруг его осей, акселерометр позволяет измерять линейные ускорения устройства, что важно для управления дроном и поддержания его ориентации и стабилизации в пространстве.

Для сравнения были выбраны наиболее популярные модули. Результаты сравнения представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Сравнение модулей с гироскопом и акселерометром

Параметры сравнения	GY-521	GY-91	GY-9255
Напряжение питания	3.3 – 5 В	3.3 – 5 В	3.3 – 5 В
Потребляемый ток	до 4 мА	до 10 мА	до 6 мА
Диапазон измерений акселерометра	$\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16 \text{ g}$	$\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16 \text{ g}$	$\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16 \text{ g}$
Диапазон измерений гироскопа	$\pm 250 \pm 500$ $\pm 1000 \pm 2000 \text{ }^\circ/\text{с}$	$\pm 250 \pm 500$ $\pm 1000 \pm 2000 \text{ }^\circ/\text{с}$	$\pm 250 \pm 500$ $\pm 1000 \pm 2000 \text{ }^\circ/\text{с}$
Интерфейсы	I2C, SPI	I2C, SPI	I2C, SPI
Рабочая температура	от -40 до +85 °C	от -40 до +85 °C	от -40 до +85 °C
Размеры	13 мм × 20 мм	21 мм × 15 мм	15 мм × 25 мм

Модуль GY-521 – это инерционный модуль, который используется для измерения ускорения, угловой скорости и магнитного поля в трех измерениях. Он основан на чипе MPU-6050, который включает в себя трёхосевой гироскоп, трёхосевой акселерометр и дополнительно имеет магнитометр HMC5883L, что позволяет определять ориентацию объекта в пространстве и его движение.

Микросхема MPU6050 имеет 16-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который обеспечивает точность измерений. Модуль имеет встроенный фильтр Калмана низких частот для уменьшения шума и стабилизации данных.

Обмен данными между модулем GY-521 и микроконтроллером осуществляется по шине I2C. Необходимое напряжение питания для модуля MPU6050 регулирует встроенный стабилизатор напряжения 3.3V.

На рисунке 1.9 представлено графическое изображение модуля.



Рисунок 1.9 – Модуль гироскопа и акселерометра GY-521 (MPU6050)

Модуль GY-91 – это небольшой электронный модуль, предназначенный для измерения параметров окружающей среды, состоящий из трёх основных компонентов: MPU-9250, BMP280 и L883. Он объединяет в себе несколько датчиков: трёхосевой акселерометр, трёхосевой гироскоп, магнитометр и барометр. Акселерометр измеряет ускорение по трем осям и позволяет определить направление силы тяжести. Гироскоп измеряет угловую скорость вращения вокруг трех осей и позволяет определить изменение ориентации объекта. Магнитометр измеряет магнитное поле и позволяет определить ориентацию в пространстве относительно магнитного поля Земли. Барометр измеряет атмосферное давление и позволяет определить высоту над уровнем моря. Использование модуля GY-91 позволяет сэкономить место в готовом устройстве, а также его конечную стоимость, если устройство предполагает использование акселерометра, гироскопа и барометра.

Модуль GY-91 подключается к микроконтроллеру или компьютеру через интерфейс I2C или SPI и может быть использован с различными платформами, такими как Arduino, Raspberry Pi и другие.

Изображение модуля GY-91 представлено на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Модуль гироскопа, акселерометра и барометра GY-91 (MPU9250 + BMP280)

Модуль GY9255 основан на микросхеме MPU-9255, которая представляет собой мульти-чип, состоящий из двух чипов, интегрированных в общий корпус. Первая часть модуля состоит из трёхосевого гироскопа и трёхосевого акселерометра. Вторая часть модуля, собранная на чипе АК8963, представляет собой магнитометр. Модуль не требует сложной калибровки с использованием сложных и дорогостоящих приборов. MPU-9255 может использоваться для сопряжения с несколькими цифровыми датчиками (например, датчики давления и другие).

GY9255 оснащен интерфейсами I2C и SPI, которые позволяют передавать 16-битные данные с АЦП. Модуль включает в себя поддержку для автоматического распознавания активности и обеспечивает высокую точность при низком энергопотреблении.

Изображение модуля GY-9255 представлено на рисунке 1.11.

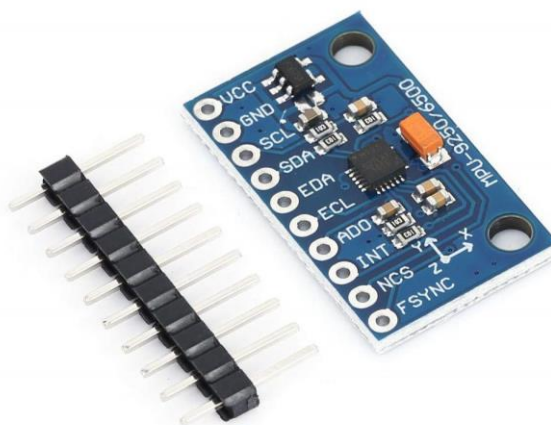


Рисунок 1.11 – Модуль гироскопа и акселерометра GY-9255 (MPU9255)

Для получения информации о данных модулях использовалась техническая спецификация [22] и источники [18, 19, 20, 21].

Как видно из сравнения, все рассмотренные модули имеют схожие характеристики. Отличительным является модуль GY-91, который помимо акселерометра и гироскопа также включает в себя барометр, что является важным параметром, если у микроконтроллера недостаточно выходов для подключения отдельного модуля барометра.

1.4.3 Обзор барометров

Барометр в БПЛА используется для измерения атмосферного давления и высоты полета, что обеспечивает функцию удержания высоты. При наличии барометра дрон способен зависать в одной точке на определенной высоте. В таблице 1.7 приведены сравнительные характеристики наиболее популярных модулей барометров.

Таблица 1.7 — Сравнение барометров

Параметры сравнения	GY-68	GY-91	GY-BM
Напряжение питания	1.8 – 3.6 В	3 – 5 В	1.7 – 3.6 В
Потребляемый ток	до 5 мА	до 10 мА	до 2 мА
Диапазон измерений барометра	300 – 1100 гПа (от +9000 до -500 м)	300 – 1100 гПа (от +9000 до -500 м)	300 – 1100 гПа (от +9000 до -500 м)
Точность измерений барометра	±1 гПа	±1 гПа	±1 гПа
Интерфейсы	I2C	I2C, SPI	I2C, SPI
Рабочая температура	от -40 до +85 °С	от -40 до +85 °С	от -40 до +85 °С
Размеры	13 мм × 10 мм	21 мм × 15 мм	11 мм × 15 мм

GY-68 – это компактный датчик атмосферного давления и температуры на основе датчика BMP180, который построен на магниторезистивной технологии, производства Bosch. Он предназначен для измерения атмосферного давления и температуры в реальном времени.

Модуль имеет интерфейс I2C, который позволяет легко подключить его к микроконтроллеру или другому устройству. Он также оснащен встроенным конвертером аналого-цифрового сигнала (ADC), который обеспечивает точное измерение атмосферного давления и температуры.

GY-68 имеет высокую точность измерения атмосферного давления (до 0.01 гПа) и температуры (до 0.1 градуса Цельсия). Диапазон измерения давления составляет от 300 до 1100 гПа, а диапазон измерения температуры от -40 до +85 градусов Цельсия.

Изображение модуля GY-68 представлено на рисунке 1.12.



Рисунок 1.12 – Модуль барометра GY-68 (BMP180)

GY-91 – это многофункциональный модуль, который был описан в разделе 1.4.2.

Дальнейшим развитием GY-68 является модуль GY-BM, который представляет из себя высокоточный цифровой измеритель атмосферного давления на базе чипа BMP280 от фирмы BOSCH. После изготовления каждый датчик проходит индивидуальную калибровку в заводских условиях. Его малые размеры, низкое энергопотребление и высокая измерительная способность позволили завоевать популярность среди множества разработчиков Arduino-проектов. Модуль BMP280 был разработан фирмой как более технологичная модель своего предшественника BMP180. Данная модификация, в отличие от своего младшего брата, предоставляет пользователю целых 2 последовательных интерфейса обмена данными (SPI и I2C), а также 2 режима работы: режим низкого энергопотребления и режим высокой производительности.

На рисунке 1.13 представлено изображение модуля GY-BM.

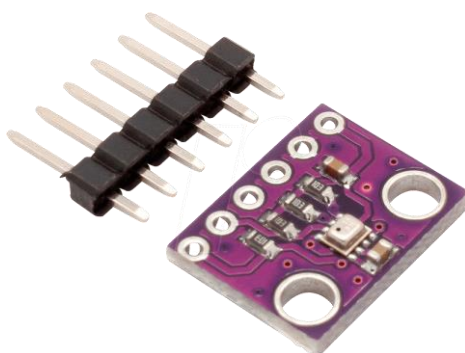


Рисунок 1.13 – Модуль барометра GY-BM (BMP280)

Для получения информации о модулях барометров использовалась техническая спецификация [24] и источники [19, 20, 23, 25].

После рассмотрения модулей барометров видно, что все они имеют схожие характеристики. Модуль GY-BM является более новой моделью модуля GY-68, поэтому является более предпочтительным. Модуль GY-91 совмещает в себе барометр, акселерометр и гироскоп, что дает ему преимущество при установке на небольшом устройстве.

1.4.4 Обзор модулей GPS

GPS (система глобального позиционирования) – спутниковая система навигации, обеспечивающая измерение расстояния, времени и определение местоположения во всемирной системе координат.

Определение местоположения устройства происходит путём измерения моментов времени приёма синхронизированного сигнала от навигационных спутников антенной потребителя. Для определения трёхмерных координат GPS-приёмнику нужно принимать сигнал четырех или более GPS-спутников.

Модуль GPS необходим для удержания позиции квадрокоптера в пространстве. Это значит, что, если ветер его сдует на некоторое расстояние в

сторону (обычно это сантиметры или десятки сантиметров), бортовая электроника выполнит возврат летательного аппарата в ту самую точку где он находился первоначально. Эта функция очень упрощает управление квадрокоптером и считается необходимой для качественной видеосъемки.

Кроме этого, дроны, оснащённые GPS, как правило способны выполнять дальние полёты по заранее заданной программе, без участия оператора и не требуя управления пультом.

В таблице 1.8 приведены сравнительные характеристики наиболее популярных модулей GPS.

Таблица 1.8 — Сравнение модулей GPS

Параметры сравнения	NEO-6M	ATGM336H
Прием сигнала	BDS / GPS / GLONASS / GALILEO / QZSS / SBAS	BDS / GPS / GLONASS / GALILEO / QZSS / SBAS
Напряжение питания	3 – 5 В	5 В
Максимальный потребляемый ток	45 мА	25 мА
Время холодного старта	38 с	35 с
Время горячего старта	1 с	1 с
Точность позиционирования	до 5 м	< 2 м
Частота обновления	5 Гц	1 – 10 Гц
Чувствительность	162 дБ	162 дБ
Максимальная высота	18000 м	18000 м
Скорость подключения по UART	9600 бод	115200 бод
Интерфейс	UART	UART
Рабочая температура	от -40 до +85 °С	от -40 до +85 °С
Размеры	30 мм × 23 мм	10.1 мм × 9.7 мм
Вес комплекта	18 г	21 г

Для приема GPS сигнала и определения местоположения устройства возможно использование GPS модуля NEO-6M. Данный модуль является популярным выбором для любительских устройств. Основой модуля является чип NEO-6M-0-001, который позволяет отслеживать до 22 спутников одновременно на 50 каналах, обладает высокой чувствительностью и энергопотреблением всего 45 мА. Определение местоположения происходит до 5 раз в секунду с точностью в 2.5 м.

Для подключения модуль использует UART на скоростях от 4800 до 230400 бод. Напряжение питания варьируется в диапазоне от 3.3 до 5 в, что позволяет подключить его без дополнительных микросхем сдвига логического уровня как к Arduino, так и к Raspberry Pi.

Изображение модуля NEO-6M представлено на рисунке 1.14.

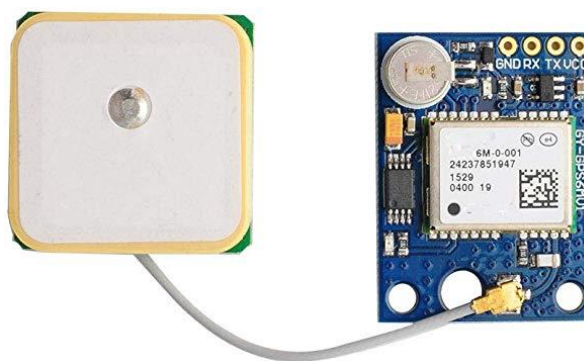


Рисунок 1.14 – Модуль GPS NEO-6M

Модуль GPS ATGM336H – GPS-модуль, позволяющий получать координаты устройств с помощью системы глобального позиционирования. Модуль построен на базе GPS-чипа AT6558, имеет встроенную память и резервную батарею для хранения настроек.

AT6558 – это спутниковый навигационный модуль с 32 каналами отслеживания, которые могут одновременно принимать до шести спутников используемые для навигационных систем. Данный модуль обладает высокой чувствительностью и низким энергопотреблением. Подходит для автомобильной и переносной навигации. Изображение модуля GPS ATGM336H представлено на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 – Модуль GPS ATGM336H

Для получения информации о GPS модулях использовалась техническая спецификация [26, 28] и источники [27, 29].

Были рассмотрены модули GPS NEO-6M и GPS ATGM336H и их характеристики. Как видно, модуль GPS ATGM336H имеет большую частоту обновления, скорость подключения по UART и точность позиционирования, чем, несомненно, превосходит свой аналог GPS NEO-6M. Модуль GPS

ATGM336H компенсирует свои недостатки меньшим потреблением тока. По всем остальным параметрам модули имеют схожие характеристики.

1.4.5 Обзор двигателей

Двигатели БПЛА – это устройства, которые создают подъемную силу, необходимую для полета летательного аппарата. В зависимости от модели и назначения, двигатели могут иметь различные характеристики, такие как: размер, мощность, тип и другие. Наиболее распространенными типами двигателей для дронов являются электрические двигатели, которые, в свою очередь, подразделяются на коллекторные (щеточные) и бесколлекторные (бесщеточные) [30]. Основное отличие коллекторного двигателя от бесколлекторного заключается в его конструкции.

Двигатель коллекторного типа состоит из корпуса, внутри которого есть плюс и минус (одна фаза). Его основная задача – преобразование электроэнергии в механическую энергию или наоборот. Он неподвижен и имеет щеточно-коллекторный узел. Коллектор представляет собой набор контактов, которые расположены на вращающемся элементе (роторе). Щетка – скользящий контакт, который расположен на неподвижном элементе (статоре). В движение приводится ротор с помощью щеток, подающих постоянный ток на обмотку. Направление вращения зависит от полярности.

К плюсам коллекторных двигателей можно отнести: небольшой вес и габариты, низкая цена, простота ремонта и обслуживания. Из минусов можно выделить: низкий коэффициент полезного действия (КПД), малая скорость вращения, перегрев, маленький ресурс, хрупкость.

Бесколлекторный электромотор состоит из вращающегося ротора с постоянными магнитами и неподвижного статора с электромагнитами. Смена направления вращения производится путем смены полярности. Такие электромоторы обладают разным числом полюсов, и чем их больше, тем медленнее, но со значительным усилием, вращается ротор.

Бесколлекторные двигатели имеют следующие плюсы: большая скорость вращения, износостойчивость, стойкость к внешним воздействиям, высокий КПД, долговечность. По сравнению с коллекторными двигателями, бесколлекторные являются более тихими, а также меньше весят и нагреваются. Из недостатков можно выделить: высокая цена, сложность ремонта.

Коллекторные двигатели применяются обычно на дронах начального уровня. В дронах средней и премиальной категории преимущественно устанавливаются двигатели бесколлекторного типа.

Для сравнения были выбраны двигатели бесколлекторного типа, результаты сравнения представлены в таблице 1.9. На рисунке 1.16 приведено графическое изображение сравниваемых двигателей.

Таблица 1.9 — Сравнение двигателей

Параметры сравнения	LD-Power 1106 4200KV	EMAX 1104 4300KV	HappyMode 1 EX1102 9000KV	SKYSTARS KOKO 1404 3000KV	EMAX RS1408 2300KV
Тип	бесколлекторный	бесколлекторный	бесколлекторный	бесколлекторный	бесколлекторный
Диаметр вала	1.5 мм	1.5 мм	1.5 мм	1.5 мм	1.5 мм
Количество оборотов на 1 вольт	4200	4300	9000	3000	2300
Питание	2S – 4S LiPo	2S – 3S LiPo	1S – 2S LiPo	3S – 4S LiPo	4S LiPo
Максимальный ток	17.5 А	12 А	6.5 А	20 А	30 А
Максимальная мощность	120 Вт	80 Вт	70 Вт	130 Вт	200 Вт
Максимальная тяга	190 г	120 г	40 г	280 г	560 г
Рекомендуемый пропеллер	2 – 3 дюйма	2 – 3 дюйма	1.9 – 2.5 дюйма	3 – 4 дюйма	2 – 4 дюйма
Размер	11 × 6 мм	11 × 4 мм	11 × 2 мм	11 × 4 мм	11 × 8 мм
Вес	7.3 г	5.5 г	2.5 г	12.8 г	12 г



Рисунок 1.16 – Двигатели: *а* – LD-Power 1106 4200KV, *б* – EMAX 1104 4300KV, *в* – HappyModel EX1102, *г* – SKYSTARS KOKO 1404 3000KV, *д* – EMAX RS1408

Для получения информации о рассмотренных двигателях использовались источники [31, 33, 35], а также товары [32, 34, 36, 37, 38].

1.4.6 Обзор регуляторов оборотов двигателей

Electronic Speed Controller (ESC) – это электронный регулятор скорости, который управляет скоростью вращения двигателей [39]. Это важная функция, которая позволяет управлять полетом БПЛА, изменяя скорость вращения двигателей в зависимости от требований. ESC принимают сигналы от полетного контроллера и передают эти сигналы каждому из двигателей, чтобы контролировать скорость и направление их вращения. ESC также обеспечивает защиту от перегрузок и коротких замыканий, чтобы защитить двигатели и другие компоненты системы от повреждений.

Принцип работы ESC заключается в преобразовании постоянного тока, поступающего от аккумулятора, в переменный ток, который подается на двигатель. Для управления скоростью вращения двигателя, ESC использует модуляцию ширины импульсов (ШИМ), где длина импульса управляет скоростью вращения двигателя. Когда ESC получает сигнал от приемника или полетного контроллера, он преобразует этот сигнал в сигнал ШИМ, который отправляется на двигатель. Сигнал ШИМ состоит из серии коротких импульсов, которые имеют разную длину, соответствующую желаемой скорости вращения двигателя. ESC также может иметь встроенные функции защиты, такие как защита от перегрузки, защита от короткого замыкания, защита от низкого заряда аккумулятора и другие. Кроме того, ESC может иметь настройки, позволяющие пользователю изменять настройки скорости, торможения и другие параметры.

Важно отметить, что каждый тип двигателя может требовать различных настроек ESC. Поэтому, при выборе ESC необходимо убедиться, что он совместим с используемым типом двигателя и сигналами управления, которые будут использоваться в системе [40].

Первый параметр, на который нужно обратить внимание при выборе регулятора – это максимальный ток, он измеряется в амперах. Моторы потребляют энергию при вращении, если им нужен ток больше, чем может выдать регулятор, то регулятор начнет греться и в итоге выйдет из строя. При использовании регуляторов с большим запасом по току мы получаем дополнительный вес, увеличенный размер и, возможно, большую цену. Достоинство такого подхода – меньше шанс выхода регуляторов из строя, а эффективность работы регуляторов немного выше.

Ещё одна вещь, о которой стоит задуматься – какой ток может выдать аккумулятор. Большинству дронов достаточно регуляторов на 20 А, так как четырехбаночные аккумуляторы емкостью 1300 – 1500 мА*ч не выдают большую мощность продолжительное время (то есть 20А регулятор выдерживает подобные нагрузки).

Emax BIHeli ESC – это электронный регулятор скорости, разработанный компанией Emax для использования в различных типах летательных аппаратов, таких как квадрокоптеры, самолеты и мультикоптеры. Он основан

на программном обеспечении BtHeli, который предоставляет возможность настройки и управления различными параметрами регулятора.

Особенности регулятора Emax BtHeli ESC включают в себя:

1. Быстродействие: высокая частота обновления до 500 Гц, что обеспечивает быструю реакцию на изменения сигналов управления и плавное управление двигателями.

2. Надежность: встроенная защита от перегрузки, короткого замыкания, перегрева и низкого уровня напряжения аккумулятора.

3. Настройка: возможность изменения настроек, таких как максимальная скорость, торможение, стартовый режим и другие параметры, позволяющие пользователю настроить регулятор под свои потребности и требования.

4. Поддержка различных типов двигателей: Emax BtHeli ESC поддерживает различные типы двигателей, в том числе бесколлекторные моторы (BLDC) и моторы постоянного тока (DC).

Среди аналогов Emax BtHeli ESC можно выделить:

1. Hobbywing XRotor Micro [41]: поддерживает множество настроек и функций, имеет высокую частоту обновления до 600 Гц и защиту от различных сбоев.

2. Flycolor Raptor [42]: компактный регулятор с поддержкой функции OneShot125 и возможностью настройки различных параметров.

3. T-Motor V2 [43]: регулятор с высоким качеством сборки, возможностью настройки и защитой от перегрузки, короткого замыкания и других сбоев.

Все рассмотренные регуляторы классифицируются по максимальному току. Графическое изображение регуляторов представлено на рисунке 1.17.

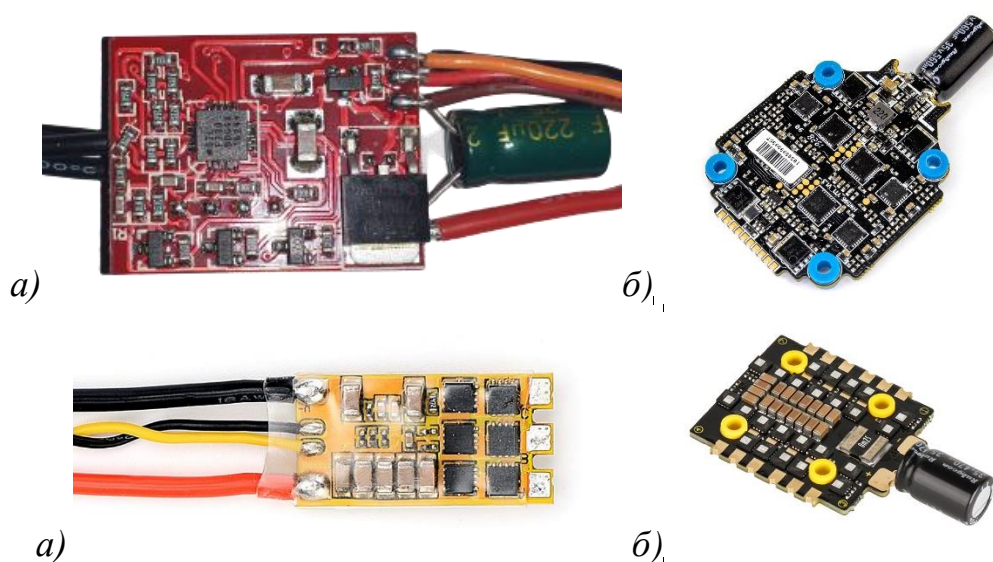


Рисунок 1.17 – Регуляторы оборотов: а – Emax BtHeli ESC, б – Hobbywing XRotor Micro, в – Flycolor Raptor, г – T-Motor V2

2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ

Изучив предметную область разрабатываемой системы, были разработаны основные требования, которые должны быть выполнены при реализации дипломного проекта. Для упрощения разработки системы разобьем ее на структурные блоки.

2.1 Описание основных блоков устройства

В результате разбиения летательного устройства были определены следующие блоки:

- блок обработки информации контроллера полёта;
- блок определения ориентации в пространстве;
- блок определения высоты;
- блок приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта;
- блок индикации;
- блок управления двигателями;
- блок питания контроллера полёта.

Устройство дистанционного управления подразделяется на следующие блоки:

- блок обработки информации устройства управления;
- блок управления летательным аппаратом;
- блок взаимодействия с настройками управления;
- блок приёма и передачи радиосигнала устройства управления;
- блок отображения информации;
- блок питания устройства управления.

Структурная схема, иллюстрирующая перечисленные блоки и связи между ними приведена на чертеже ГУИР.400201.022 Э1.

Блоки были выделены таким образом, чтобы каждый из них выполнял определённую задачу, и обеспечивали корректную работу системы в целом. Далее рассмотрим принцип работы и задачи каждого из перечисленных выше блоков, а также их взаимодействие между собой.

2.2 Блок обработки информации контроллера полёта

Блок обработки информации контроллера полёта – это основной блок разрабатываемого летательного устройства, центральным звеном которого является микроконтроллер. Данный блок производит большую часть вычислений и связывает между собой другие блоки. Микроконтроллер предназначен для сбора и обработки данных, получаемых с других блоков контроллера полёта, а также управления этими блоками в реальном времени.

Блок обработки информации контроллера полёта выполняет следующий ряд задач, связанных с передачей данных и сбором информации:

1. Получение и обработка данных, поступающих с блока радиопередачи контроллера полёта.

2. Сбор и обработка данных, полученных с блока определения ориентации в пространстве.

3. Сбор и обработка данных, поступающих с блока определения высоты.

4. Взаимодействие с блоком управления двигателями.

5. Передача управляющих сигналов на блок индикации.

В общем случае, блок обработки информации на БПЛА отвечает за последовательный сбор данных с датчиков устройства и получения команд с блока радиопередачи. После этого блок производит все необходимые расчеты и преобразования, а затем передает управляющие сигналы на блок управления двигателями и блок индикации.

В задачи рассматриваемого блока также входит предварительная конфигурация и инициализация других блоков, таких как: блок приёма и передачи радиосигнала, блок определения ориентации в пространстве, блок определения высоты, блок управления двигателями.

Питание, необходимое для включения и стабильной работы блока обработки информации, будет поступать от блока управления двигателями.

2.3 Блок определения ориентации в пространстве

Блок определения ориентации в пространстве использует инерциальные датчики для измерения скорости, ускорения и угловой скорости, чтобы определить положение и ориентацию БПЛА в пространстве. Данный блок является наиболее важным для стабилизации устройства так как на основе измеряемых в этом блоке параметров система корректирует работу дрона, чтобы он не отклонялся от заданного направления.

Блок содержит инерциальные датчики, такие как трёхосевой акселерометр и гироскоп, которые работают вместе и обеспечивают точное измерение движения и ориентации летательного устройства.

Данные, получаемые в блоке определения ориентации в пространстве, поступают на блок обработки информации контроллера полёта и обрабатываются с помощью специальных алгоритмов, таких как фильтр Калмана.

Конфигурируется блок с помощью блока обработки информации контроллера полёта при запуске БПЛА с целью минимизации погрешностей и обеспечения стабильной работы. Для этого вычисляются отклонения по трём осям устройства в неподвижном состоянии.

2.4 Блок определения высоты

Функцией данного блока является измерение высоты, на которой находится летательное устройство в реальном времени, что позволяет ему правильно позиционировать себя относительно земли и обеспечивает

безопасные и эффективные полеты и посадку. На основе этих измерений выполняется команда «Удержания высоты», при которой устройство зависает на одной, заданной высоте.

При проектировании БПЛА могут быть использованы различные методы для определения высоты. Один из таких методов – это измерение атмосферного давления, которое уменьшается с увеличением высоты над уровнем моря.

Для измерения давления и определения высоты будет использован барометрический датчик. Измеряемые параметры в блоке определения высоты передаются блоку обработки информации контроллера полёта, который их анализирует и вносит необходимые изменения в работу дрона.

2.5 Блок приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта

Устройство дистанционного управления должно взаимодействовать с летательным устройством. Для этого необходимо организовать связь посредством радиосигнала, что предполагает разработку блока приёма и передачи радиосигнала.

Радиопередача между дроном и устройством управления позволяет оператору дистанционно управлять полетом летательного устройства, получать данные и контролировать его положение в режиме реального времени. Данный блок должен быть установлен как на устройстве управления, так и на самом БПЛА. Между двумя блоками радиопередачи настраивается соединение на заданном радиоканале, что позволяет им обменяться информацией.

Конфигурируется рассматриваемый блок с помощью блока обработки информации. Данные, которые необходимо отправить на блок приёма и передачи радиосигнала устройства управления, поступают от блока обработки информации контроллера полёта. Если блок получает данные от блока приёма и передачи радиосигнала устройства управления, то он передаёт их на блок обработки информации.

2.6 Блок индикации

Блок индикации необходим для информирования пользователя о состоянии работы устройства. Он состоит из пары светодиодов, каждый из которых имеет свой цвет. Комбинация светодиодов, а также время их мигания, позволяет сформировать различные сообщения пользователю.

Работа с блоком индикации осуществляется через блок обработки информации контроллера полёта, который отдает необходимые команды по включению/отключению нужного светодиода, тем самым подавая на блок индикации необходимое питание.

2.7 Блок управления двигателями

Блок управления двигателями отвечает за контроль и регулирование работы двигателей. Он является одним из ключевых в работе БПЛА так как обеспечивает перемещение устройства в воздушном пространстве, позволяет ему подняться и держаться над землей.

Блок управления двигателями в разрабатываемом комплексе представляет собой четыре бесколлекторных мотора и регулятор оборотов для каждого из моторов.

Данный блок управляется блоком обработки информации контроллера полёта, который передает управляющие ШИМ сигналы для запуска того или иного двигателя. Питание, необходимое для работы двигателей, поступает от регуляторов оборотов, а к ним от – блока питания.

2.8 Блок питания контроллера полёта

Блок питания необходим для обеспечения устройства электроэнергией. Питание является важной составляющей любого устройства, поскольку без электроэнергии оно не может работать. Надлежащее питание обеспечивает работу всех компонентов устройства и позволяет ему выполнять свои функции. В зависимости от типа устройства и его конструкции, могут использоваться различные источники питания, такие как аккумуляторные батареи, электрическая сеть, солнечные батареи и так далее.

В качестве источника питания будут использоваться аккумуляторные батареи так как разрабатываемый дрон должен функционировать без прямого подключения к электрической сети.

Блок питания, установленный на БПЛА должен подавать разное питание на блок обработки информации и блок управления двигателями. Блок управления двигателями потребляет больше энергии, поэтому питание будет поступать на этот блок, а в последствии идти на блок обработки информации и другие блоки летательного устройства.

2.9 Блок обработки информации устройства управления

Блок обработки информации устройства управления – это основной блок разрабатываемого устройства управления, центральным звеном которого является микроконтроллер. Данный блок необходим для связи всех блоков устройства, выполнения вычислений и преобразований. Микроконтроллер предназначен для сбора и обработки данных, получаемых с других блоков устройства управления, а также отправки этих данных на блок приёма и передачи радиосигнала.

Блок обработки информации устройства управления выполняет следующий ряд задач, связанных с передачей данных и сбором информации:

1. Сбор и обработка данных, поступающих с блока управления летательным аппаратом.

2. Обработка данных, поступающих с блока взаимодействия с настройками управления.

3. Передача данных на блок отображения информации.

4. Передача данных на блок приёма и передачи радиосигнала.

Блок обработки информации на устройстве управления отвечает за последовательный сбор данных с блока управления летательным аппаратом и блока взаимодействия с настройками управления. После этого блок производит все необходимые расчеты и преобразования, а затем передает управляющие сигналы на блок приёма и передачи радиосигнала, а также блок отображения информации.

В задачи рассматриваемого блока также входит предварительная конфигурация и инициализация других блоков устройства управления.

Питание, необходимое для включения и стабильной работы блока обработки информации, будет поступать от блока питания устройства управления.

2.10 Блок управления летательным аппаратом

Блок управления летательным аппаратом является одним из наиболее важных в разрабатываемом устройстве управления так как с помощью него пользователь задает необходимые команды, которые должен выполнять БПЛА.

Блок представляет собой пару джойстиков, один из которых отвечает за поднятие летательного устройства на определенную высоту, другой – задает направление движения. В состав блока также могут входить дополнительные тумблеры или кнопки, с помощью которых пользователь может задать необходимые команды для управления дроном.

Все изменения в блоке управления летательным аппаратом передаются на блок обработки информации устройства управления с помощью аналоговых и цифровых сигналов.

2.11 Блок взаимодействия с настройками управления

Блок взаимодействия с настройками управления косвенно связан с блоком управления летательным аппаратом так как позволяет изменять параметры управления. Блок помогает пользователю настроить управление под себя и скорректировать значения, которые будут переданы на летательное устройство.

Блок представлен набором кнопок и тумблеров, каждый из которых отвечает за свой параметр.

Все изменения в блоке взаимодействия с настройками управления передаются на блок обработки информации устройства управления, где в

последствия сохраняются в память устройства и применяются при обработке данных.

2.12 Блок приёма и передачи радиосигнала устройства управления

Блок приёма и передачи радиосигнала устройства управления выполняет функции, аналогичные блоку приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта БПЛА, описанные в пункте 2.5.

Рассматриваемый блок устанавливается на устройстве управления и необходим для передачи команд летательному устройству по радиосвязи. Данные для передачи поступают от блока обработки информации устройства управления.

2.13 Блок отображения информации

Блок отображения информации представляет собой ЖКИ-экран, устанавливаемый на устройство управления. Главная функция блока – это информирования пользователя о текущих параметрах. Блок позволяет пользователю узнать состояние заряда устройства, посмотреть данные, поступающие с блока управления летательным аппаратом, а также увидеть ошибки, при их наличии.

Вся отображаемая информация поступает с блока обработки данных устройства управления в реальном времени.

2.14 Блок питания устройства управления

Блок питания устройства управления выполняет функции, аналогичные блоку питания контроллера полёта БПЛА, описанные в пункте 2.8.

На устройстве управления необходимо предусмотреть преобразование входного напряжения до двух значений: 3.3В и 5В так как большинство элементов работают именно с этими значениями напряжения. В качестве источника питания будут использоваться аккумуляторные батареи.

3 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ

В предыдущем разделе (см. раздел 2 Разработка структурной схемы) была спроектирована структура разрабатываемого комплекса и приведено описание основных блоков системы. В данном разделе блоки будут описаны с точки зрения разработки функций, которые реализуются в данном дипломном проекте. Функциональная схема устройства представлена на чертеже ГУИР.400201.022 Э2.

3.1 Блоки летательного устройства

Летательное устройство включает в себя следующие блоки:

- блок обработки информации контроллера полёта;
- блок определения ориентации в пространстве;
- блок определения высоты;
- блок приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта;
- блок индикации;
- блок управления двигателями;
- блок питания контроллера полёта.

3.1.1 Блок обработки информации контроллера полёта

Блок обработки информации контроллера полёта – это основной блок разрабатываемого летательного устройства, центральным звеном которого является микроконтроллер. По результатам анализа в пункте 1.3 была выбрана модель микроконтроллера ATmega328P-AU.

С точки зрения основных функциональных возможностей, микроконтроллер включает в себя [44]:

1. Центральный процессор (CPU). ATmega328P-AU имеет 8-битный RISC-процессор с тактовой частотой до 20 МГц. Он также поддерживает инструкции, которые позволяют быстро выполнять операции с памятью и переходить в другие части программы.

Преимущественно CPU состоит из арифметико-логического устройства (АЛУ), общих регистров назначения (РОН), регистров статуса, регистра инструкций, счетчика команд и декодера команд.

2. Встроенную память. Микроконтроллер имеет 32 Кбайт флэш-памяти для хранения программного кода, 2 Кбайт оперативной памяти (SRAM) и 1 Кбайт EEPROM для хранения данных.

Оперативная память содержит в себе различные глобальные данные и стек каждой задачи. Все обрабатываемые и отправляемые пакеты данных располагаются в оперативной памяти.

Постоянная память хранит все исполняемые инструкции разработанного программного кода и неизменяемые данные. Постоянная память может быть

перезаписана с помощью программного кода или с помощью внешнего программатора с использованием интерфейса JTAG.

3. Входы/выходы (I/O). ATmega328P-AU имеет 23 программируемых входа/выхода (GPIO), каждый из которых может быть настроен как вход или выход. GPIO могут использоваться для подключения различных периферийных устройств, таких как датчики, дисплеи и другие. Они предназначены для простых функций, таких как подача сигнала enable, переключения ключей, подача импульсов. На входах/выходах можно задавать необходимость подтягивающих резисторов. В большинстве I/O разделяют функции с другими подсистемами микроконтроллера.

4. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Микроконтроллер имеет 10-битный АЦП с 8 входами, который позволяет преобразовывать различные значения напряжения в цифровой формат для их контроля и анализа.

Сигнал, поступивший на вход АЦП захватывается с помощью специальной схемы. Далее управляющий автомат АЦП выдает значение, поступающее на вход цифро-аналогового преобразователя. Входной сигнал АЦП и выходной сигнал внутреннего ЦАП сравниваются с помощью компаратора и в зависимости от результата сравнения подбирается новое цифровое значение, пока оно не приблизится к уровню, совпадающему с измеряемым сигналом. АЦП имеет несколько каналов, которые измеряют несколько разных входных напряжений циклически последовательно их переключая.

Максимальный и минимальный уровень напряжения, которому соответствует максимально и минимальное цифровое значение соответственно определяется с помощью опорных напряжений. Поэтому на вход АЦП должно поступать напряжение, которое меньше опорного.

5. Таймеры/счётчики. Таймеры и счётчики могут использоваться для измерения времени, генерации сигналов, таких, как ШИМ-сигнал, и других задач. ATmega328P-AU имеет три 8-битных таймера/счётчика и один 16-битный таймер/счётчик. Каждый из них имеет свои режимы работы и может быть настроен на генерацию прерываний, что позволяет создавать различные события в процессе работы микроконтроллера.

Для настройки таймеров в микроконтроллере ATmega328P-AU используются регистры управления таймерами.

6. ШИМ-генераторы. Микроконтроллер имеет 6 каналов ШИМ-генераторов, которые могут использоваться для управления яркостью светодиодов, скоростью двигателей и других задач. Более подробно ШИМ рассмотрено в пункте 3.3.6.

7. Коммуникационные интерфейсы. ATmega328P-AU поддерживает различные коммуникационные интерфейсы, такие как UART, SPI и I2C, что позволяет ему общаться с другими устройствами. Используемые в проекте интерфейсы рассмотрены в пункте 3.3.

Блок-схема микроконтроллера представлена на рисунке 3.1.

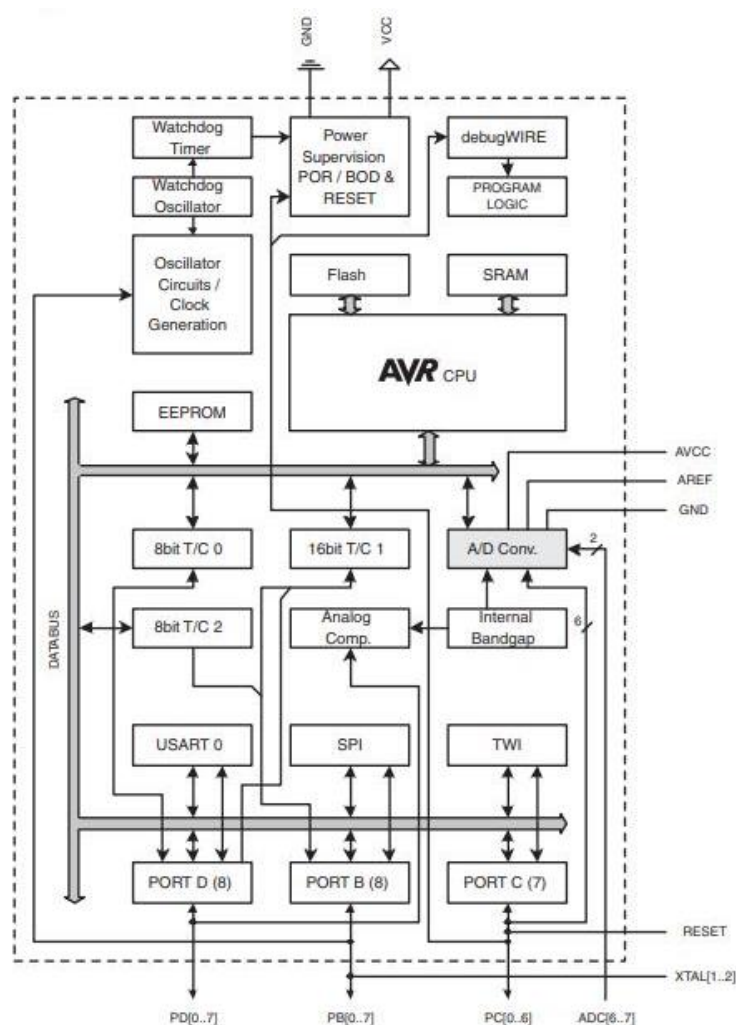


Рисунок 3.1 – Блок-схема микроконтроллера ATmega328P-AU

3.1.2 Блок определения ориентации в пространстве

Блок определения ориентации в пространстве представляет собой совокупность инерционных датчиков: трёхосевой акселерометр и гироскоп. Исходя из обзора модулей акселерометра и гироскопа, представленного в пункте 1.4.2, для проекта была выбрана модель GY-521.

Модуль GY-521 реализует следующие функциональные возможности:

1. Измерение ускорения. Модуль GY-521 может измерять ускорение в трёх направлениях (по осям x, y и z) благодаря установленному на модуль трёхосевому акселерометру.

2. Измерение скорости вращения. Модуль GY-521 имеет гироскоп, который может измерять скорость вращения объекта в трёх направлениях.

3. Функция DMP (Digital Motion Processor). Модуль GY-521 имеет встроенный цифровой процессор движения (DMP), который может выполнять ряд задач, таких как обработка данных с датчиков и расчет ориентации объекта. Это может упростить процесс программирования и обработки данных.

4. Интерфейсы коммуникации. Модуль GY-521 поддерживает несколько интерфейсов коммуникации, включая I2C и SPI, что позволяет подключать его к широкому диапазону устройств и микроконтроллеров.

5. Переменная скорость передачи данных. Модуль GY-521 позволяет изменять скорость передачи данных между модулем и микроконтроллером, что может быть полезно для оптимизации производительности и энергопотребления.

Общение между блоком определения ориентации в пространстве и микроконтроллером осуществляется по интерфейсу I2C, описанному в разделе 3.3.1.

Схема модуля GY-521 [45] представлена на рисунке 3.2.

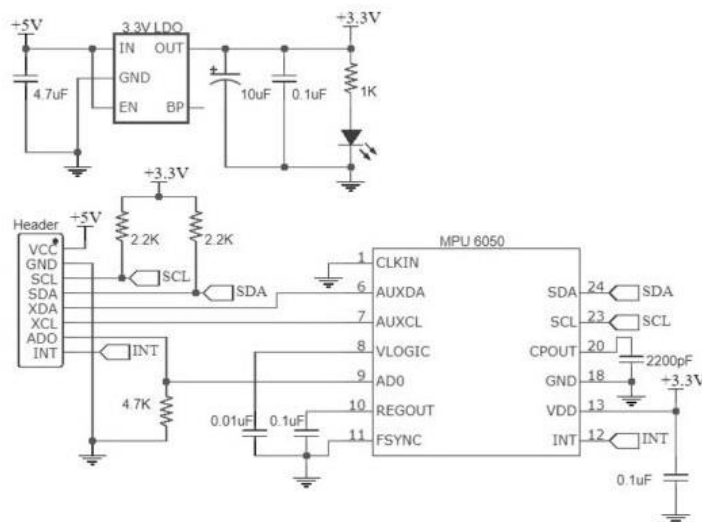


Рисунок 3.2 – Схема модуля GY-521

3.1.3 Блок определения высоты

Блок определения высоты представлен в виде барометра. В качестве барометра был выбран модуль GY-68, исходя из рассмотренных характеристик в пункте 1.4.3.

Основные функциональные возможности модуля GY-68 включают:

1. Измерение атмосферного давления. Модуль GY-68 оснащен датчиком давления, который может измерять атмосферное давление в диапазоне от 300 до 1100 гПа. Измерение происходит с точностью до 0,02 гПа, что позволяет получить точные данные о текущем давлении и выполнить расчеты по определению высоты.

2. Измерение температуры. Модуль включает датчик температуры, который может измерять температуру в диапазоне от -40 до +85 градусов Цельсия. Измерение происходит с точностью до 0,5 градусов Цельсия.

3. Калибровка. Модуль GY-68 может быть откалиброван для повышения точности измерений. Калибровка происходит с использованием специальных

алгоритмов, которые позволяют устранить ошибки, связанные с факторами окружающей среды.

4. Интерфейс I2C. Модуль GY-68 может быть легко подключен к микроконтроллеру через интерфейс I2C, что обеспечивает быстрый и простой способ получения данных от датчика. Более детально интерфейс I2C описан в разделе 3.3.1.

Схема модуля GY-68 [46] представлена на рисунке 3.3.

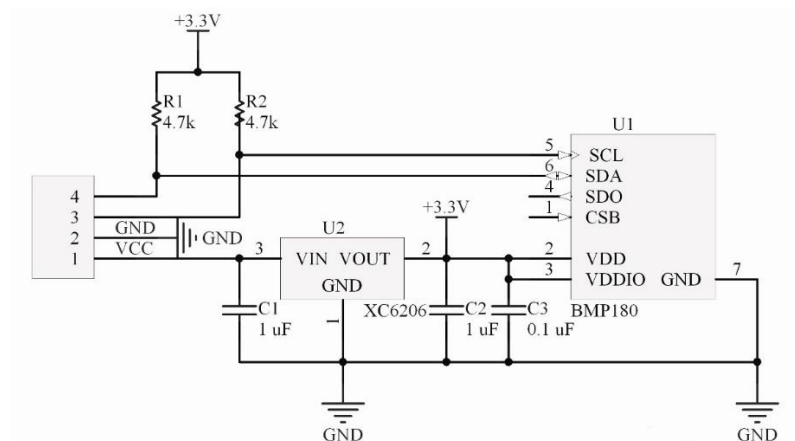


Рисунок 3.3 – Схема модуля GY-68

3.1.4 Блок приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта

Блок приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта представляет собой радиомодуль, который позволяет передавать данные, используя радиосигнал. С точки зрения передачи радиосигнала, рассматриваемый блок реализует ведомое устройство. После рассмотрения радиомодулей, представленных на рынке, в пункте 1.4.1, была выбрана модель NRF24L01.

Блок-схема радиомодуля NRF24L01 [47] представлена на рисунке 3.4.

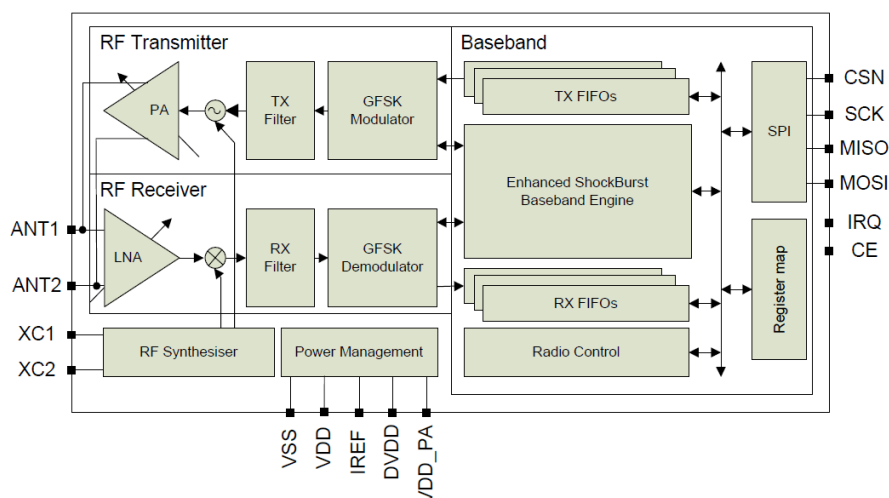


Рисунок 3.4 – Блок-схема радиомодуля NRF24L01

Некоторые из функциональных возможностей модуля NRF24L01 включают:

1. Беспроводная связь. Модуль позволяет обмениваться данными между двумя или более устройствами на расстоянии до 100 метров без использования проводов.

2. Конфигурация каналов. Модуль NRF24L01 имеет 126 различных каналов для беспроводной связи, что позволяет избежать помех от других беспроводных устройств, работающих на той же частоте.

3. Шифрование данных. NRF24L01 поддерживает шифрование данных для защиты от несанкционированного доступа к передаваемым данным.

4. Поддержка интерфейса SPI. Модуль поддерживает протокол SPI, что позволяет подключать его к микроконтроллеру, используя интерфейс протокола. Более детально интерфейс SPI описан в пункте 3.4.1.

Обмен данными между блоком приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта и микроконтроллером осуществляется по интерфейсу SPI, описанному в пункте 3.3.2.

Передача данных между радиомодулями NRF24L01 осуществляется по протоколу ESB, который описан в пункте 3.3.4.

Модуль изменяет передаваемый сигнал, используя GFSK модуляцию, рассмотренную в пункте 3.3.5.

Схема радиомодуля NRF24L01 [48] представлена на рисунке 3.5.

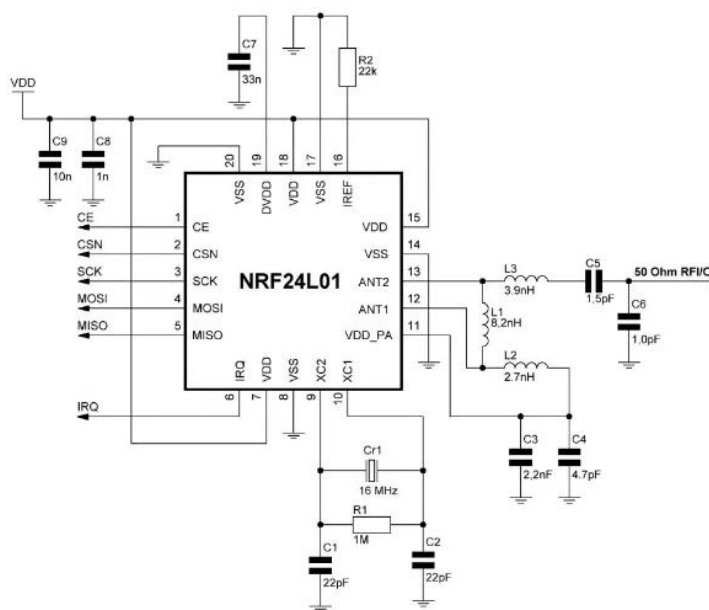


Рисунок 3.5 – Схема радиомодуля NRF24L01

3.1.5 Блок индикации

Блок индикации представлен в виде двух светодиодов, устанавливаемых на летательное устройство. Светодиод (LED) – это электронный компонент,

который преобразует электрическую энергию в световую энергию. В разрабатываемом комплексе блок выполняет функцию информирования о подключении БПЛА к устройству управления, а также отображения наличия ошибок в работе, если они присутствуют.

Светодиоды отличаются цветом свечения и, соответственно, длиной излучаемой волны, а также входным напряжением [49]. На рисунке 3.6 представлено распределение длины световой волны в зависимости от цвета светодиода.



Рисунок 3.6 – Цвет в зависимости от длины световой волны

Предполагается использовать светодиоды разного цвета, например: синий и красный.

3.1.6 Блок управления двигателями

Блок управления двигателями состоит из самих двигателей и регуляторов оборотов двигателей. Всего в блоке устанавливается четыре бесколлекторных двигателя и четыре регулятора. Каждый двигатель подключается к отдельному регулятору скорости.

Двигатели выполняют функцию поднятия летательного устройства над землей и позволяют ему перемещаться в воздушном пространстве. После рассмотрения нескольких моделей двигателей в пункте 1.4.5, была выбрана модель LD-Power 1106 4200KV.

Регулятор оборотов должен уметь взаимодействовать с выбранной моделью двигателя и необходим для обеспечения плавного старта и корректной работы мотора. В связи с этим, после рассмотрения моделей регуляторов в пункте 1.4.6 была выбрана Emax BIHeli ESC.

С точки зрения выполняемых функций, Emax BIHeli ESC обладает следующими возможностями [50]:

1. Работа с различными типами моторов, включая бесколлекторные двигатели.

2. Поддержка автоматической настройки. ESC может автоматически настраиваться под подключенный мотор, что упрощает процесс установки.

3. Защита от перегрева. Регулятор имеет встроенную внутреннюю защиту от перегрева, что позволяет предотвратить повреждения от высоких температур.

4. Обеспечение плавного старта двигателей. ESC поддерживает функцию «безболезненного старта», что уменьшает износ моторов и улучшает качество полета.

Регулятор оборотов двигателей включает в себя:

1. Микроконтроллер. Встроенный в ESC микроконтроллер работает под управлением прошивки, например, BiHeli. Он управляет работой и параметрами регулятора.

2. MOSFET-транзисторы. Представляют собой полевой транзистор с изолированным затвором. Он работает как ключ: драйвер затвора подает сигнал – MOSFET открывается и подает ток на определенную область статора, тем самым, заставляя магниты вращать колокол двигателя из-за того, что обмотка (статор) попеременно меняет напряжение в определенных частях так, чтобы магниты начинали притягиваться в определенный момент времени к определенной части статора – таким образом, колокол двигателя начинает вращаться. Все это происходит много раз за доли секунды.

3. Драйвер затвора. Драйвер затвора управляет кучей MOSFET-транзисторы, о которых рассказано выше. Он определяет, когда полевому транзистору открыться, а когда закрыться.

4. Другие элементы, такие как: фильтрующие конденсаторы, датчик тока, стабилизатор напряжения.

На рисунке 3.7 приведено графическое изображение взаимодействия регулятора скорости и подключённого к нему двигателя.

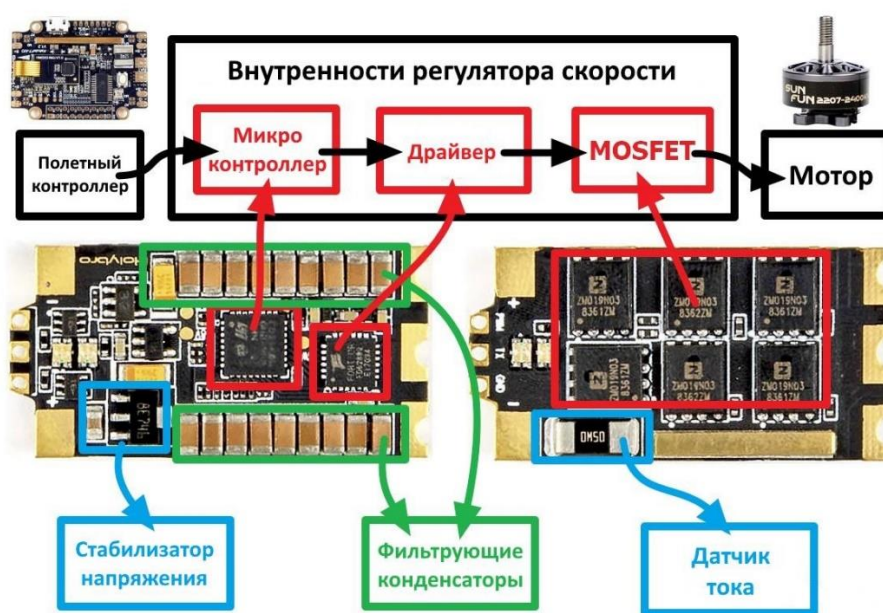


Рисунок 3.7 – Взаимодействие регулятора скорости и двигателя

3.1.7 Блок питания контроллера полёта

Данный функциональный блок обеспечивает питанием датчики и элементы, установленные на летательное устройство. Блок состоит из аккумулятора, который выдает напряжение 7.4 В. В блоке также присутствуют дополнительные стабилизаторы и элементы, обеспечивающие преобразование напряжения до нужных значений и контролирующие правильность подключения питания.

Большинство датчиков и элементов, устанавливаемых на БПЛА, работают от напряжения 3.3 В и 5 В. Следовательно, питание, которое поступает на эти элементы, должно быть преобразовано до 5 В и 3.3 В – эту функцию выполняют стабилизаторы напряжения.

Питание с блока поступает не напрямую, а проходит через блок управления двигателями. Напряжение, получаемое от аккумулятора (7.4 В), изначально идет на четыре установленных регулятора скорости так как это основной потребитель энергии всей схемы. На ESC установлен преобразователь напряжения до 5 В, поэтому микроконтроллер и остальные элементы питаются от стабилизаторов напряжения, подключенных к выходу одного из регуляторов.

3.2 Блоки устройства управления

Устройство дистанционного управления подразделяется на следующие блоки:

- блок обработки информации устройства управления;
- блок управления летательным аппаратом;
- блок взаимодействия с настройками управления;
- блок приёма и передачи радиосигнала устройства управления;
- блок отображения информации;
- блок питания устройства управления.

3.2.1 Блок обработки информации устройства управления

Блок обработки информации устройства управления представлен в виде микроконтроллера ATmega328P-AU и имеет схожий функционал с блоком обработки информации контроллера полёта, описанного в пункте 3.1.

Дополнительно, на устройстве управления к блоку обработки информации подключается внешний EEPROM, расширитель портов и преобразователь интерфейса USB в UART.

Внешний EEPROM предназначен для хранения данных во внешней памяти, которая может быть доступна микроконтроллеру или другому устройству через определенный интерфейс [51]. В реализуемом комплексе

внешняя память подключается к микроконтроллеру посредством I2C интерфейса, описанного в пункте 3.3.1.

Функциональные возможности внешней EEPROM включают следующее:

1. Чтение и запись данных. Подключенный микроконтроллер может записывать данные в память и читать их из нее. Это позволяет сохранять данные между сеансами работы устройства.

2. Безопасное хранение данных. Внешняя память обычно имеет механизмы защиты данных, такие как контроль четности или аппаратную защиту от записи, которые помогают защитить хранимые данные от ошибок и несанкционированного доступа.

3. Устойчивость к воздействию окружающей среды. EEPROM обычно имеет улучшенную устойчивость к температурным и электромагнитным воздействиям.

4. Большой объем памяти. По сравнению с встроенной в микроконтроллер EEPROM, внешняя память имеет достаточный объем для хранения большого количества данных.

Устанавливаемый на устройство управлений расширитель портов MCP23017 взаимодействует с микроконтроллером по I2C интерфейсу и позволяет управлять до 16 цифровыми входами/выходами (I/O) с помощью всего двух выводов микроконтроллера. Главная функция, которую выполняет расширитель портов – экономия выходов ATmega328P-AU.

MCP23017 позволяет управлять каждым входом отдельно, задавая необходимую конфигурацию, а также генерировать прерывания при изменении состояния входов, что позволяет микроконтроллеру быстро реагировать на изменения [52]. Блок-схема MCP23017 представлена на рисунке 3.8.

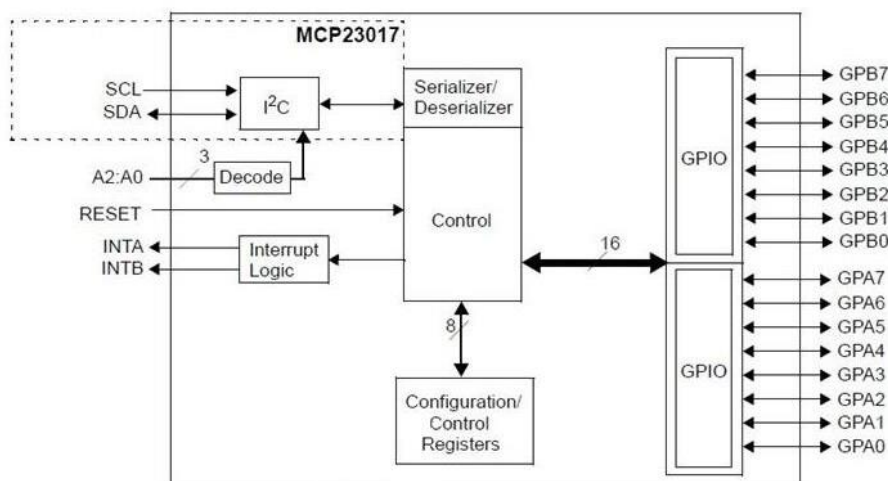


Рисунок 3.8 – Блок-схема расширителя портов MCP23017

Преобразователь интерфейса USB в UART устанавливается на устройство управления и представляет собой микросхему CH340G –

универсальный USB-конвертер последовательного интерфейса (UART), который позволяет передавать данные между компьютером и другими электронными устройствами через USB-порт [53].

Микросхема CH340G связана с микроконтроллером и с её помощью будет осуществляться программирование устройства управления через установленный USB-порт, данные которого преобразуются и передаются по UART интерфейсу, с которым работает ATmega328P-AU. Также микросхема имеет встроенный регулятор напряжения, который позволяет питать компоненты устройства от USB-порта.

3.2.2 Блок управления летательным аппаратом

Блок управления летательным аппаратом состоит из двух джойстиков, которые позволяют пользователю управлять полётом БПЛА. Один джойстик отвечает за скорость вращения двигателей устройства. Другой джойстик имеет две оси: ось тангажа и ось крена. Они предназначены для управления движением БПЛА вперед/назад и влево/вправо соответственно.

Все джойстики подключаются напрямую к аналоговым входам микроконтроллера и питаются от напряжения 5 В.

3.2.3 Блок взаимодействия с настройками управления

Данный блок состоит из 8 тактовых кнопок, двух микротумблеров на 2 позиции и двух микротумблеров на 3 позиции. Кнопки подключаются к одному аналоговому входу микроконтроллера и, в зависимости от поступающего сигнала, микроконтроллер определяет, какая кнопка была нажата/отжата. Все микротумблеры связываются с микроконтроллером через подключение к расширителю портов, описанному в пункте 3.2.1.

Задача рассматриваемого блока – обеспечение возможности пользователю физически изменять или сохранять настройки разрабатываемого устройства. Каждая кнопка будет отвечать за определенное действие, как, например: смещение центра джойстика по крену на 1, смещение центра джойстика по тангажу на 1, изменение диапазона скорости, сохранение настроек.

3.2.4 Блок приёма и передачи радиосигнала устройства управления

Блок приёма и передачи радиосигнала устройства управления представлен в виде радиомодуля и имеет такой же функционал, что и блок приёма и передачи радиосигнала контроллера полёта, описанный в пункте 3.1.4.

С точки зрения передачи радиосигнала, данный блок реализует ведущее устройство.

3.2.5 Блок отображения информации

Блок отображения информации устанавливается на устройство управления и необходим для вывода данных пользователю. Рассматриваемый блок состоит из графического жидкокристаллического дисплея с разрешением 160 x 128 пикселей и диагональю 1.77 дюйма, использующий контроллер ST7735S. Он обладает множеством функциональных возможностей, таких как:

1. Отображение изображений, графики текста и символов.
2. Поддержка 18-битного цвета, что позволяет отображать до 262144 оттенков цвета.
3. Режим монохромного отображения.
4. Наличие встроенного контроллера с памятью для хранения изображений и графики.

Принцип работы модуля LCD 160x128 1.77 ST7735S заключается в следующем:

1. Контроллер микросхемы ST7735S получает информацию о том, какие пиксели нужно отобразить на дисплее, и генерирует соответствующие сигналы для управления дисплеем.
2. Контроллер отправляет данные о цвете пикселей и их координатах на дисплейный модуль.
3. Каждый пиксель состоит из трех цветовых составляющих – красной, зеленой и синей (RGB). Контроллер дисплея сочетает эти цвета в нужной пропорции, чтобы создать желаемый цвет пикселя.
4. Когда все пиксели были обновлены на дисплее, контроллер дисплея генерирует сигнал окончания вывода и переходит в режим ожидания новых данных.

Питается модуль от напряжения 3.3 В и подключается к микроконтроллеру посредством SPI интерфейса [54].

3.2.6 Блок питания устройства управления

Данный функциональный блок обеспечивает питанием модули и элементы, установленные на устройство управления. Блок состоит из аккумулятора, который выдает напряжение 3.7 В. Так как большинство элементов работают от напряжения 3.3 В и 5 В, то питание аккумулятора подключается к повышающему DC-DC преобразователю до 5 В. Напряжение, получаемое от преобразователя, поступает на стабилизаторы напряжения на 3.3 В и 5 В. Элементы схемы питаются уже от стабилизаторов. Дополнительно устанавливается диод Шотки, который контролирует полярность подключения питания.

В блоке также предусмотрена возможность зарядки устройства управления. Эту функцию выполняет подключаемая к аккумулятору микросхема TP4056 – контроллер заряда Li-ion аккумуляторов [55]. Принцип ее работы состоит в следующем:

1. Контроллер заряда измеряет напряжение на аккумуляторе и определяет, нужно заряжать аккумулятор или нет.

2. Если аккумулятор необходимо зарядить, контроллер заряда настраивает ток зарядки. Это делается путем установки напряжения на выходе регулировки тока зарядки.

3. Контроллер заряда следит за процессом зарядки и переключает зарядное устройство с постоянного тока на пульсирующий ток, когда аккумулятор приближается к полной зарядке. Это позволяет зарядить аккумулятор полностью и увеличить его срок службы.

4. Контроллер заряда обеспечивает защиту от перегрузки и короткого замыкания, чтобы предотвратить повреждение аккумулятора или других компонентов, подключенных к нему.

Схема контроллера заряда представлена на рисунке 3.9.

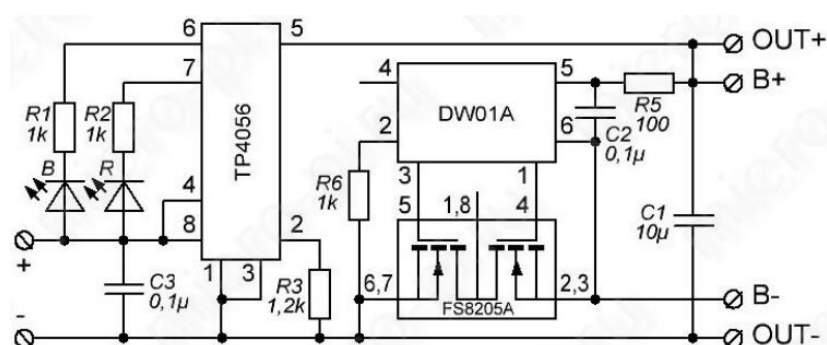


Рисунок 3.9 – Схема контроллера заряда TP4056

3.3 Интерфейсы и протоколы

Данный пункт описывает, как различные компоненты и устройства общаются друг с другом. Будут рассмотрены интерфейсы и протоколы, которые используются в разрабатываемом комплексе. Помимо этого, также будет рассмотрена широко-импульсная модуляция и GFSK модуляция.

3.3.1 Интерфейс I2C

Интерфейс I2C представляет собой последовательную асимметричную шину для связи между интегральными схемами внутри электронных приборов, которая использует две двунаправленные линии связи: SDA (Data) и SCL (Clock).

SDA – это линия передачи данных, которая используется для передачи битов данных в обоих направлениях между микроконтроллером и устройством [56]. SCL – это линия синхронизации тактовых импульсов, которая контролирует скорость передачи данных и синхронизирует передачу данных между устройствами.

Диаграмма передачи данных по интерфейсу I2C представлена на рисунке 3.10.

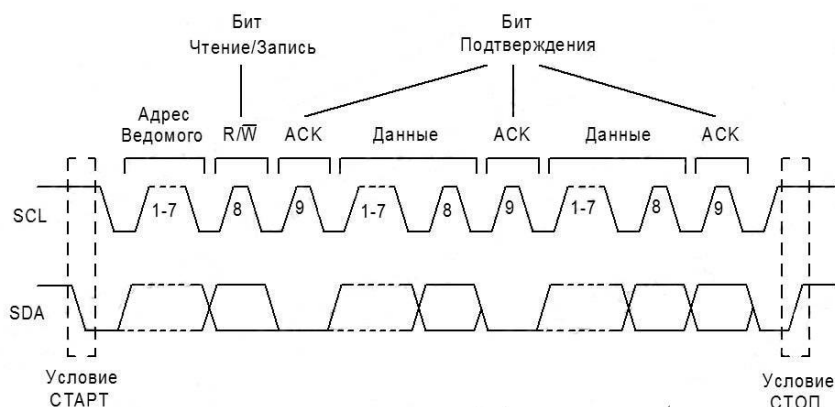


Рисунок 3.10 – Диаграмма передачи данных по интерфейсу I2C

Всего на одной шине I2C может быть до 127 устройств. Каждое устройство распознается по уникальному адресу и может работать как передатчик или приёмник, в зависимости от назначения. Кроме того, при передаче данных, устройства могут быть классифицированы как ведущие и ведомые. Ведущий – это устройство, которое инициирует передачу данных и вырабатывает сигналы синхронизации. При этом любое адресуемое устройство считается ведомым по отношению к ведущему. Исходя из спецификации работы шины, в каждый отдельный момент в шине может быть только один ведущий, а именно то устройство, которое обеспечивает формирование сигнала SCL шины. Ведущий может выступать как в роли ведущего-передатчика, так и ведущего-приемника.

Процедура обмена начинается с того, что ведущий формирует состояние «СТАРТ» – генерация перехода сигнала линии SDA из высокого состояния в низкое при высоком уровне на линии SCL. Этот переход воспринимается устройствами, подключенными к шине, как признак начала процедуры обмена. Процедура обмена завершается тем, что ведущий формирует состояние «СТОП» – переход состояния линии SDA из низкого состояния в высокое при высоком уровне на линии SCL. Состояния всегда вырабатываются ведущим. Считается, что шина занята после фиксации состояния «СТАРТ». Шина считается освободившейся через некоторое время после фиксации состояния «СТОП».

Данные по шине I2C передаются 8-битными словами. После каждого слова передается один бит подтверждения приема приемной стороной, выставляемый на шину SDA.

Изначально шиной поддерживался 7-битный адрес и скорость передачи в 100 кбит/с. Позже спецификация была дополнена и теперь возможна 10-битная адресация и скорость до 400 кбит/с.

3.3.2 Интерфейс SPI

SPI – последовательный синхронный интерфейс для передачи данных в режиме полного дуплекса, предназначенный для обеспечения простого и недорогого высокоскоростного сопряжения микроконтроллеров и периферии.

В SPI используются четыре цифровых сигнала:

1. MOSI – выход ведущего, вход ведомого. Служит для передачи данных от ведущего устройства ведомому.

2. MISO – вход ведущего, выход ведомого. Служит для передачи данных от ведомого устройства ведущему.

3. SCLK или SCK – последовательный тактовый сигнал. Служит для передачи тактового сигнала для ведомых устройств.

4. CS или SS – выбор ведомого устройства (сигнал является инверсным, активный уровень – низкий).

Передача осуществляется пакетами. Длина пакета, как правило, составляет 1 байт (8 бит), при этом известны реализации SPI с иной длиной пакета, например, 4 бита. Ведущее устройство инициирует цикл связи установкой низкого уровня на выводе выбора подчиненного устройства (SS), с которым необходимо установить соединение [57].

В простейшем случае к ведущему устройству подключено единственное ведомое устройство и необходим двусторонний обмен данными. В таком случае используется трехпроводная схема подключения. Интерфейс SPI позволяет подключать к одному ведущему устройству несколько ведомых устройств, причем подключение может быть осуществлено следующими способами: структура связи «звезда», структура связи «кольцо». На рисунке 3.11 представлены схемы подключения нескольких ведомых устройств.

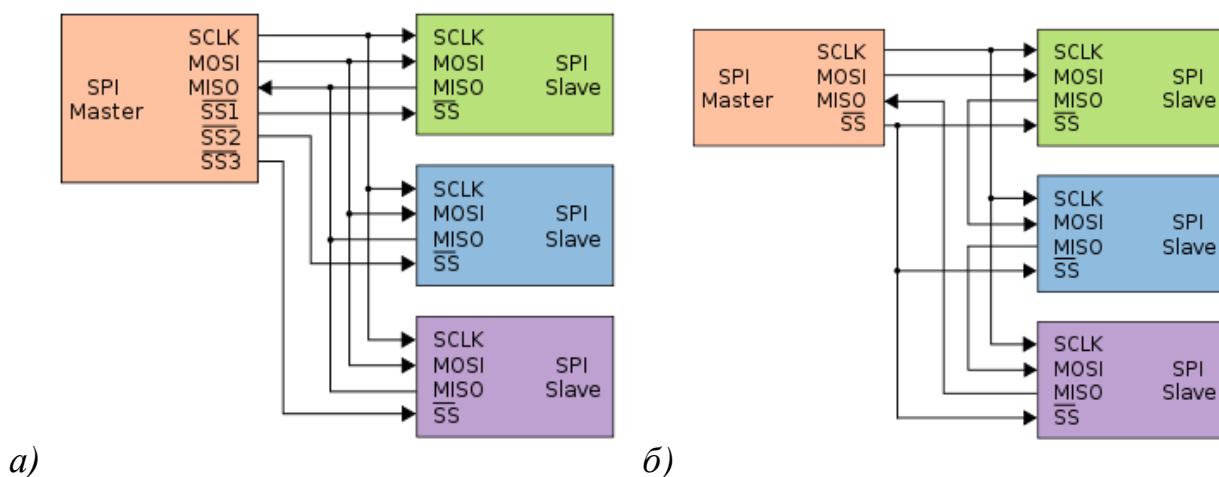


Рисунок 3.11 – Схема подключения нескольких ведомых устройств по шине SPI: *а* – структура связи «звезда», *б* – структура связи «кольцо»

В процессе SPI передачи используется классический способ преобразования данных из параллельной формы в последовательную с помощью регистра сдвига (см. рисунок 3.12).

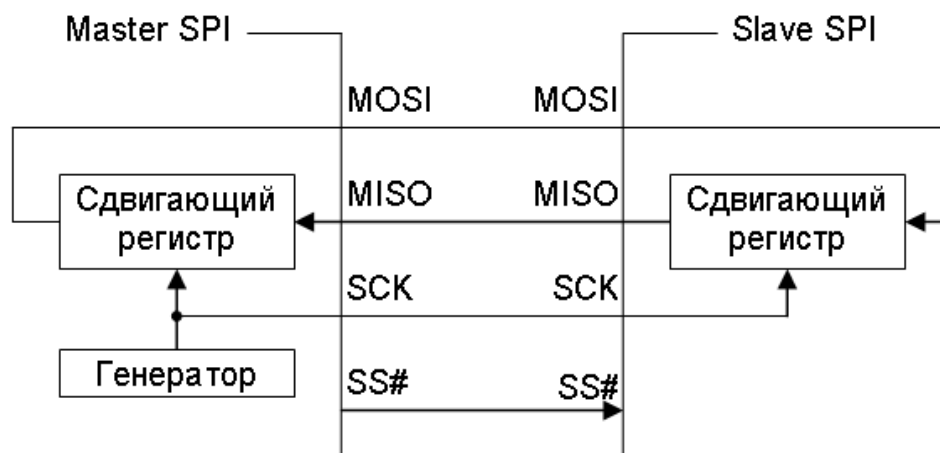


Рисунок 3.12 – Формат передачи данных по интерфейсу SPI

Сначала по шине данных или из некоторого буферного регистра производится параллельная загрузка данных в сдвигающий регистр. Далее, по тактовому сигналу SCLK, формируемому ведущим устройством SPI, выполняется побитовый сдвиг данных в сдвигающем регистре. Данные, выдвигаемые с одной стороны регистра, формируют выходной сигнал устройства; входные данные устройства побитно вводятся с другой стороны регистра. Это одновременно происходит как в ведущем, так и в ведомом устройстве. Тактовый сигнал SCLK, который формируется ведущим устройством, является общим для ведущего и ведомого и синхронизирует сдвиг данных в сдвигающих регистрах и фиксацию информации на двух линиях данных (MOSI – от ведущего, MISO – от ведомого).

3.3.3 Интерфейс UART

Интерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) является одним из наиболее распространенных интерфейсов для связи между устройствами в электронике. Он представляет собой асинхронный последовательный интерфейс, который может использоваться для передачи данных в двух направлениях, как от устройства к устройству, так и в обратном направлении [58].

UART состоит из двух линий связи: линии передачи (TX) и линии приема (RX). TX линия передает данные в виде последовательности битов, а RX линия принимает эти биты и декодирует их обратно в исходные данные.

Передача данных в UART осуществляется по одному биту в равные промежутки времени. Этот временной промежуток определяется заданной скоростью UART и для конкретного соединения указывается в бодах (что в

данном случае соответствует битам в секунду). Существует общепринятый ряд стандартных скоростей: 300; 600; 1200; 2400; 4800; 9600; 19200; 38400; 57600; 115200; 230400; 460800; 921600 бод.

Помимо информационных битов, UART автоматически вставляет в поток синхронизирующие метки, так называемые стартовый и стоповый биты (см. рисунок 3.13). При приёме эти лишние биты удаляются из потока. Обычно стартовый и стоповый биты обрамляют один байт информации (8 бит), при этом младший информационный бит передаётся первым, сразу после стартового. Для формирования временных интервалов передающий и приёмный UART имеют источник точного времени (тактирования).

Принято соглашение, что пассивным (в отсутствие потока данных) состоянием входа и выхода UART является логическая 1. Стартовый бит всегда является логическим 0, поэтому приёмник UART ждёт перепада из 1 в 0 и отсчитывает от него временной промежуток в половину длительности бита (середина передачи стартового бита). Если в этот момент на входе всё ещё 0, то запускается процесс приёма минимальной последовательности. Для этого приёмник отсчитывает 9 битовых длительностей подряд (для 8-битных данных), и в каждый момент фиксирует состояние входа. Первые 8 значений являются принятыми данными, последнее значение – проверочное (стоп-бит). Значение стоп-бита всегда равно 1. Если реально принятое значение иное, UART фиксирует ошибку.

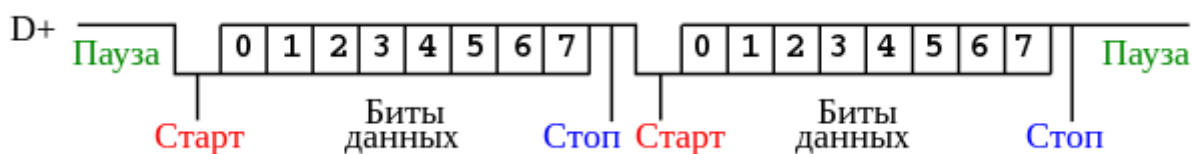


Рисунок 3.13 – Передача данных по интерфейсу UART

Поскольку синхронизирующие биты занимают часть битового потока, то результирующая пропускная способность UART меньше скорости соединения.

Многие реализации UART имеют возможность автоматически проверять целостность данных методом контроля битовой чётности. Включение или выключение этой функции производится записью соответствующего слова инициализации во внутренний регистр управления UART. Когда эта функция включена, минимальная последовательность информационных битов дополняется конечным битом контроля чётности.

3.3.4 Протокол радиопередачи ESB

Протокол радиопередачи Enhanced ShockBurst (ESB) – это высокоэффективный и надежный протокол беспроводной связи, который был разработан компанией Nordic Semiconductor для использования в

радиочастотных системах на базе кристаллов и передатчиков-приемников. Протокол поддерживает двустороннюю передачу пакетов данных, буферизацию пакетов, подтверждение пакетов и автоматическую повторную передачу потерянных пакетов [59].

Протокол ESB использует технологию частотного расширения спектра (FHSS) для обеспечения надежной и безопасной передачи данных. FHSS разбивает данные на множество небольших пакетов и передает их по разным частотам, изменяя частоту передачи в каждом кадре данных. Это позволяет избежать помех от других устройств и снизить воздействие шума на передачу. Пакеты содержат в себе заголовок, полезную нагрузку и контрольную сумму. Заголовок пакета содержит информацию о типе пакета, идентификаторе передатчика и получателя, а также другую метаинформацию.

Пакеты данных передаются в режиме burst, в котором передатчик передает набор пакетов данных подряд, ожидая подтверждения получения каждого пакета. Получатель в свою очередь проверяет целостность принятых данных и посылает обратный сигнал (ACK) в ответ на каждый полученный пакет данных. Если передатчик не получает подтверждения получения пакета данных в течение заданного времени, то он повторно передает пакет до тех пор, пока не получит подтверждение. Пример повторной передачи пакетов представлен на рисунке 3.14.

Кроме того, протокол ESB обеспечивает безопасность передачи данных с помощью шифрования AES-128. Протокол ESB поддерживает как режим двунаправленной связи, так и односторонней передачи данных. В режиме двунаправленной связи устройства могут обмениваться данными и подтверждениями. В режиме односторонней передачи данные передаются только от отправителя к получателю без подтверждения получения.

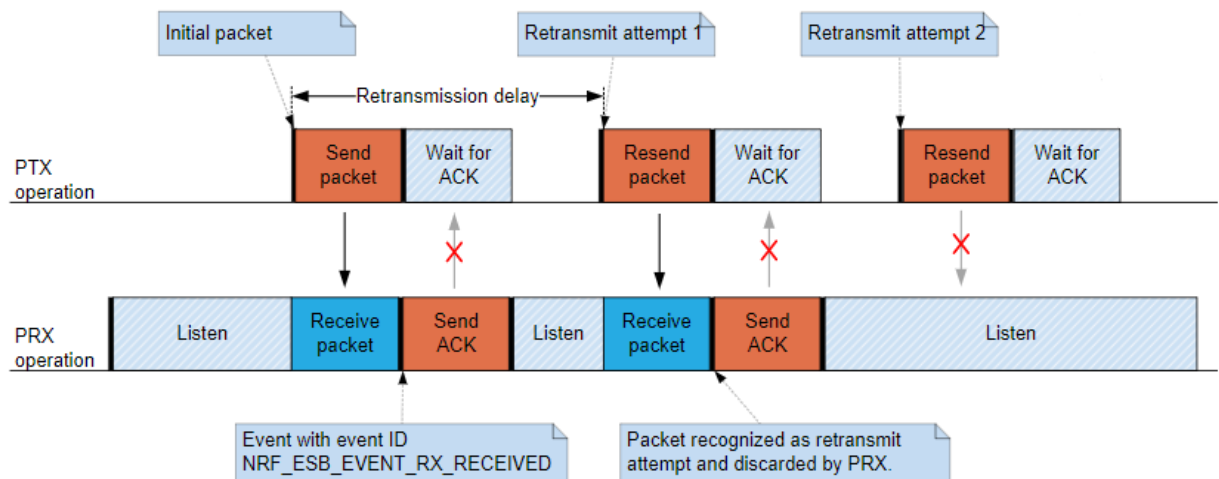


Рисунок 3.14 – Повторная передача пакетов в протоколе ESB

3.3.5 GFSK модуляция

Гауссовская частотная модуляция (GFSK) – вид частотной модуляции, при которой используется фильтр Гаусса для сглаживания частотных перестроек при изменении значения информационного символа. Он основан на частотной модуляции FSK, но с использованием гауссовской формы импульса, которая обеспечивает более эффективное использование спектральной полосы [60].

Принцип работы GFSK заключается в том, что биты данных модулируют фазовый угол несущего сигнала. Если следующий бит данных отличается от предыдущего, то фазовый угол несущего сигнала меняется, что приводит к изменению частоты несущей. Однако вместо резких изменений частоты используется гауссовская форма импульса, что сглаживает изменения частоты и позволяет уменьшить ширину спектра передаваемого сигнала. Сигнал GFSK представлен на рисунке 3.15.

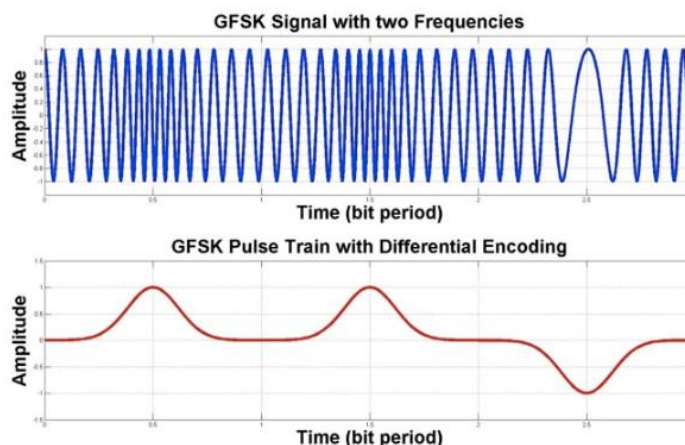


Рисунок 3.15 – Сигнал GFSK

GFSK обладает хорошей помехоустойчивостью и эффективно использует доступную полосу частот, что делает его широко применяемым в беспроводной связи, например, в Bluetooth и некоторых видов радиосвязи.

3.3.6 Широтно-импульсная модуляция

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ, англ. PWM) – это метод преобразования сигнала, при котором изменяется длительность импульса (скважность), а частота остаётся константой (см. рисунок 3.16). ШИМ часто используется в электронике для управления мощностью, например, для управления скоростью электрического двигателя или яркостью светодиодной лампы.

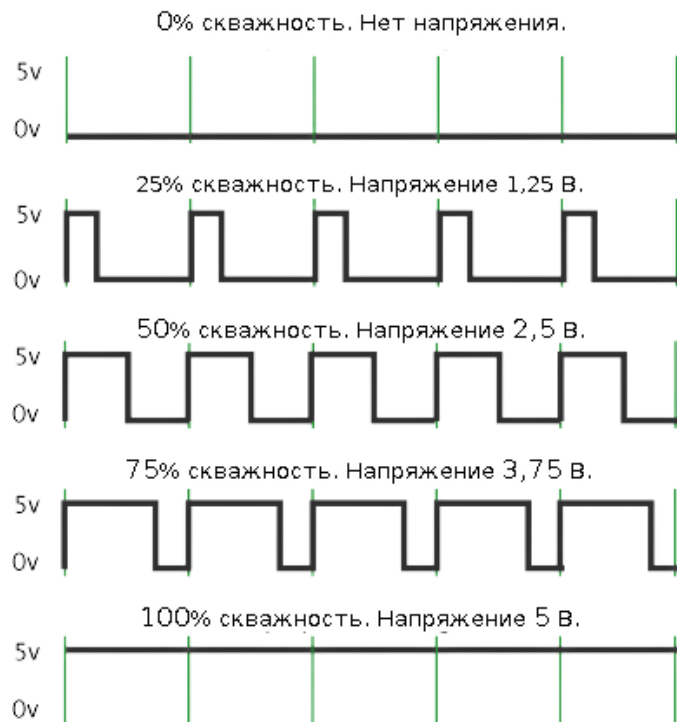


Рисунок 3.16 – Диаграмма ШИМ сигнала

Основной причиной применения ШИМ является стремление к повышению КПД [61]. В ШИМ в качестве ключевых элементов используют транзисторы (или другие полупроводниковые приборы), работающие не в линейном, а в ключевом режиме, то есть транзистор всё время либо разомкнут (выключен), либо замкнут (находится в состоянии насыщения). В первом случае транзистор имеет очень высокое сопротивление, поэтому ток в цепи весьма мал, и, хотя всё напряжение питания падает на транзисторе, выделяемая на транзисторе мощность очень мала. Во втором случае сопротивление транзистора крайне мало, и, следовательно, падение напряжения на нём близко к нулю, при этом выделяемая мощность так же мала. В переходных состояниях (переход ключа из проводящего состояния в непроводящее и обратно) мощность, выделяемая в ключе, значительна, но так как длительность переходных состояний крайне мала по отношению к периоду переключения, то средняя мощность потерь на переключение оказывается незначительной.

7 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ НА РЫНКЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ С ДИСТАНЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ»

7.1 Характеристика аппаратно-программного комплекса

Разрабатываемый в данном дипломном проекте аппаратно-программный комплекс «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением» является техническим устройством, состоящим из аппаратной части и программного обеспечения, предназначенным для выполнения полетов без участия человека на борту, управляемым с земли с помощью дистанционного управления. БПЛА широко используются в различных сферах, включая оборонную промышленность, сельское хозяйство, воздушные доставки, спасательные операции, контроль за транспортом и другие области, где требуется выполнение задач в труднодоступных и опасных условиях. Его пользователями могут быть как частные лица, так и владельцы предприятий.

Преимущество разрабатываемого аппаратно-программного комплекса – возможность модернизации в зависимости от предполагаемой области использования, поэтому пользователь может менять параметры управления, полетные функции, добавлять или же изменять программное обеспечение. Помимо возможности расширения функционала устройства, еще одним достоинством является относительно небольшая итоговая стоимость. Летательные аппараты, представленные на рынке, поставляются с закрытым исходным кодом, и их цена в разы превышает суммарную стоимость всех элементов разрабатываемого устройства.

7.2 Расчет экономического эффекта от производства аппаратно-программного комплекса

Для определения результата от вложения инвестиций в проектирование и производство аппаратно-программного комплекса необходимо определить отпускную цену аппаратно-программного комплекса на основе расчёта затрат на производство аппаратной части и разработку программной части.

Расчет прямых затрат на материалы и комплектующие изделия для производства аппаратной части комплекса осуществляется в соответствии с представленной в конструкторской документации дипломного проекта номенклатурой, нормой расхода материалов, количеством комплектующих на изделие и рыночным ценам. Для производства данного комплекса были использованы материалы, представленные в таблице 7.1, и комплектующие, представленные в таблице 7.2.

Расчет затрат по статье «Основные и вспомогательные материалы», в которую включается стоимость необходимых для изготовления изделия основных и вспомогательных материалов, осуществляется по формуле (7.1).

$$P_{\text{м}} = K_{\text{тр}} \cdot \sum_{i=1}^n H_{\text{pi}} \cdot \Pi_{\text{отпи}}, \quad (7.1)$$

где $K_{\text{тр}}$ – коэффициент транспортных расходов;

n – номенклатура применяемых материалов;

H_{pi} – норма расхода материала i -го вида на единицу изделия, нат. ед./шт.;

$\Pi_{\text{отпи}}$ – цена за единицу материала i -го вида, р.

Таблица 7.1 — Расчет затрат на основные и вспомогательные материалы

Расчет затрат на основные и вспомогательные материалы				
Наименование материала	Единица измерения	Норма расхода материала	Цена за единицу материала, р.	Сумма, р.
1. Припой ПОС 61, 100 г	г	0,28	26,21	7,60
2. Флюс ЛТИ-120, 20 мл	мл	0,4	5,79	2,32
3. МГТФ 0.12 кв.мм, Провод монтажный, 1 м	м	2,8	1,55	4,34
4. Текстолит двусторонний 1.5 мм, 100х100 мм	мм	1,8	9,80	17,64
5. Текстолит односторонний 1.5 мм, 100х100 мм	мм	0,6	8,00	4,80
6. Кембрик, 1 м	м	1,3	0,72	0,94
7. Хомут-стяжка 2.5х80 мм, 100 шт	шт	0,1	1,52	0,15
8. Пластиковая нить ABS, 1000 г	г	1,1	51,00	56,10
9. Разъем штыревой 2.54 мм, 40 шт	шт	3,8	0,69	2,62
10. Пропеллер, 1 шт	шт	4	0,72	2,88
11. Посадочное место для аккумулятора 18650, 1 шт	шт	1	0,50	0,50
12. Разъем L-KLS1-151-W, 1 шт	шт	1	0,29	0,29
Итого				100,18
Всего с учетом транспортных расходов (1,1)(P _м)				110,20

Расчет затрат по статье «Покупные комплектующие изделия, полуфабрикаты», осуществляется по формуле (7.2).

$$P_{\text{к}} = K_{\text{тр}} \cdot \sum_{i=1}^m N_i \cdot \Pi_{\text{отпи}}, \quad (7.2)$$

где $K_{\text{тр}}$ – коэффициент транспортных расходов;
 m – номенклатура применяемых комплектующих;
 N_i – количество комплектующих i -го вида на единицу изделия, нат. ед./шт.;
 $\Pi_{\text{отп}i}$ – цена за единицу комплектующего i -го вида, р.

Таблица 7.2 — Расчет затрат на комплектующие изделия

Наименование комплектующего	Количество на изделие, шт.	Цена за единицу, р.	Сумма, р.
1	2	3	4
1. Микроконтроллер ATmega328P-AU	2	16,86	33,72
2. Модуль беспроводной связи NRF24L01	2	9,00	18,00
3. Модуль трёхосевого гироскопа и акселерометра GY-521 (MPU6050)	1	8,78	8,78
4. Датчик атмосферного давления GY-68 (BMP180)	1	9,90	9,90
5. Микросхема CH340G	1	2,10	2,10
6. Микросхема MCP23017	1	5,83	5,83
7. Микросхема 03962A	1	2,38	2,38
5. Бесколлекторный двигатель LD-Power 1106 4200KV	4	6,58	26,32
6. Регулятор оборотов двигателя Emax BIHeli ESC	4	12,30	49,20
7. ЖК дисплей LCD 160x128 1.77 ST7735S	1	18,96	18,96
8. Микротумблер MTS-101-A2	2	1,34	2,68
9. Микротумблер MTS-103	2	1,96	3,92
10. Кнопка тактовая IT-1102WB	9	0,10	0,90
11. Регулируемый джойстик SHUAICHI	2	24,65	49,3
12. Модуль EEPROM ATMEL 2ECL	1	2,20	2,20
13. Аккумулятор LI-ION 18650 3.7 В	1	26,00	26,00
14. Аккумулятор 803063 7.4 В	1	32,00	32,00
15. Повышающий DC-DC преобразователь BS01 5V	1	3,20	3,20
16. Пьезодинамик	1	0,69	0,69
17. Резистор SMD 0805	32	0,04	1,28
18. Резонатор кварцевый SMD NX2520SA-16MHZ-STD-CSW-5	1	2,14	2,14
19. Резонатор кварцевый SMD 12.0 МГц КХ-К	1	1,46	1,46
20. Резонатор кварцевый SMD 16.0 МГц HC49SM	1	1,72	1,72
21. Конденсатор SMD 0805	13	0,05	0,65
22. Конденсатор SMD 6861	3	0,32	0,96
23. Конденсатор выводной 22 мкФ	3	0,05	0,15
24. Конденсатор выводной 1000 мФ	1	0,26	0,26

Продолжение таблицы 7.2

1	2	3	4
25. Светодиод SMD FYLS-1206SRC	2	0,14	0,28
26. Светодиод SMD GNL-1206UBC	2	0,17	0,34
27. Линейный стабилизатор напряжения AMS1117-3.3V	2	0,24	0,48
28. Диод Шоттки SS14	3	0,10	0,30
29. Предохранитель SMD 1206	1	0,25	0,25
Итого			306,35
Всего с учетом транспортных расходов (1,1)(P _м)			336,98

Расчет общей суммы прямых затрат на производство аппаратной части представлен в таблице 7.3.

Таблица 7.3 — Расчет общей суммы прямых затрат на производство аппаратной части

Показатель	Сумма, р.
1. Сырье и материалы	110,20
2. Покупные комплектующие изделия	336,98
Всего прямые затраты на производство аппаратной части (З _п ^{а.ч})	447,18

Расчет затрат на основную заработную плату разработчиков программной части комплекса представлен в таблице 7.4.

При расчете заработной платы используется среднемесячная заработная плата в Республике Беларусь для сотрудников ИТ-отрасли. Премия не начисляется.

Основная зарплата определяется по формуле (7.3).

$$З_o = K_{пр} \cdot \sum_{i=1}^n З_{чи} \cdot t_i, \quad (7.3)$$

где $K_{пр}$ – коэффициент премий и иных стимулирующих выплат;

n – категории исполнителей, занятых разработкой;

$З_{чи}$ – часовой оклад плата исполнителя i -й категории, р.;

t_i – трудоемкость работ, выполняемых исполнителем i -й категории, ч.

Часовая заработная плата каждого исполнителя определяется путем деления его месячной заработной платы (оклад плюс надбавки) на количество рабочих часов в месяце (расчетная норма рабочего времени на 2023 г. Для 5-дневной недели составляет 168 ч по данным Министерства труда и социальной защиты населения на момент проведения расчетов).

Таблица 7.4 — Расчет затрат на основную заработную плату команды разработчиков

Категория разработчика	Месячный оклад, р.	Часовой оклад, р.	Трудоемкость работ, ч	Итого, р.
1. Инженер-программист	2150,00	12,80	6	76,80
2. Инженер-системотехник	1620,00	9,64	12	115,68
3. Инженер-отладчик	1370,00	8,15	4	32,60
Итого				225,08
Премия и стимулирующие выплаты				0,00
Всего затраты на основную заработную плату разработчиков				225,08

Дополнительная заработная плата определяется по формуле (7.4).

$$З_{\text{д}} = \frac{З_{\text{о}} \cdot Н_{\text{д}}}{100}, \quad (7.4)$$

где $Н_{\text{д}}$ – норматив дополнительной зарплаты, 15%

Отчисления в фонд социальной защиты населения и обязательное страхование БелГосстрах ($З_{\text{сз}}$) определяется в соответствии с действующим законодательством по формуле (7.5)

$$P_{\text{соц}} = \frac{(З_{\text{о}} + З_{\text{д}}) \cdot Н_{\text{соц}}}{100} \quad (7.5)$$

где $Н_{\text{соц}}$ – норматив отчислений в ФСЗН и Белгосстрах (в соответствии с действующим законодательством по состоянию на апрель 2023 г. – 35%)

Расчет общей суммы затрат на разработку программной части программно-управляемого комплекса представлен в таблице 7.5.

Таблица 7.5 — Расчет затрат на разработку программного средства

Наименование статьи затрат	Формула/таблица для расчета	Сумма, р.
1. Основная заработная плата разработчиков	Табл. 7.4	225,08
2. Дополнительная заработная плата разработчиков	Формула (7.4)	33,76
3. Отчисления на социальные нужды	Формула (7.5)	90,59
Затраты на разработку программной части ($З_{\text{п.ч}}$)		349,43

Формирование отпускной цены аппаратно-программного комплекса осуществляется в соответствии с методикой, представленной в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Методика формирования отпускной цены аппаратно-программного комплекса

Показатель	Формула/таблица для расчета	Сумма, р.
1. Затраты на производство аппаратной части ($З_p^{a.ч}$)	Табл. 7.3	447,18
2. Затраты на разработку программной части ($З_p^{п.ч}$)	Табл. 7.5	349,43
3. Сумма затрат на производство аппаратно-программного комплекса	$З_{пр} = 447,18 + 349,43$	796,61
4. Накладные расходы	$P_{накл} = 796,61 \cdot 0,56$	446,10
5. Расходы на реализацию	$P_{рел} = 796,61 \cdot 0,02$	15,93
6. Полная себестоимость	$C_{п} = 796,61 + 446,10 + 15,93$	1258,64
7. Плановая прибыль, включаемая в цену	$P_{ед} = 1258,64 \cdot 0,25$	314,66
8. Отпускная цена	$Ц_{отп} = 1258,64 + 314,66$	1573,30

Результатом производства аппаратно-программного комплекса является прирост чистой прибыли, полученный от их реализации и рассчитываемый по формуле (7.6).

$$\Delta\Pi_{ч} = P_{ед} \cdot N_{п} \left(1 - \frac{H_{п}}{100}\right), \quad (7.6)$$

где $N_{п}$ – прогнозируемый годовой объем производства и реализации, шт.;

$P_{ед}$ – прибыль, включаемая в цену, р.;

$H_{п}$ – ставка налога на прибыль согласно действующему законодательству, % (по состоянию на апрель 2023 г. – 20 %).

$$\Delta\Pi_{ч} = 314,66 \cdot 300 \cdot (1 - 0,20) = 75518,40 \text{ р.}$$

7.3 Расчет инвестиций в проектирование и производство аппаратно-программного комплекса

Инвестиции в производство аппаратно-программного комплекса включают в общем случае:

- инвестиции на его разработку;
- инвестиции в прирост основного капитала (затраты на приобретение необходимого для производства нового изделия оборудования, станков и т.п.);
- инвестиции в прирост собственного оборотного капитала (затраты на приобретение необходимых для производства нового изделия материалов, комплектующих, начатой, но незавершенной продукции и т.п.).

7.3.1 Расчет инвестиций на разработку аппаратно-программного комплекса

Инвестиции рассчитываем (I_p) по затратам на разработку нового изделия. Для начала необходимо рассчитать заработную плату технологам и инженерам предприятия-производителя, ввиду того что именно они являются первой статьёй первичных затрат.

Расчет заработной платы разработчиков нового изделия в таблице 7.7.

Таблица 7.7 – Расчет заработной платы разработчиков нового изделия

Категория исполнителя	Численность исполнителей, чел.	Месячный оклад, р.	Дневной оклад, р.	Время, д.	Сумма, р.
1. Руководитель проекта	1	2350,00	111,90	52	5818,80
2. Инженер-программист	1	2150,00	102,38	40	4095,20
3. Инженер-системотехник	2	1620,00	77,14	52	8022,56
4. Инженер-отладчик	1	1370,00	65,24	20	1304,80
Итого					19241,36
Премия и иные стимулирующие выплаты, 30%					5772,41
Всего основная заработная плата					25013,77

Расчет затрат на разработку нового изделия представлен в таблице 7.8.

Таблица 7.8 – Расчет инвестиций на разработку нового изделия

Наименование статьи затрат	Формула/таблица для расчета	Сумма, р.
1. Основная заработная плата разработчиков Z_o	Табл. 6.7	25013,77
2. Дополнительная заработная плата разработчиков	Формула (7.4)	3752,07
3. Отчисления на социальные нужды	Формула (7.5)	10068,04
Инвестиции на разработку нового изделия		38833,88

7.3.2 Расчет инвестиций в прирост основного капитала

Инвестиции в прирост основного капитала не требуются, так как производство нового изделия планируется осуществлять на действующем оборудовании в связи с наличием на предприятии-производителе свободных производственных мощностей.

7.3.3 Расчет инвестиций в прирост собственного оборотного капитала

Расчет инвестиций в прирост собственного оборотного капитала осуществляется следующим образом:

1. Определяется годовая потребность в материалах по формуле (7.7).

$$\Pi_{\text{м}} = P_{\text{м}} \cdot N_{\text{п}}, \quad (7.7)$$

где $N_{\text{п}}$ – прогнозируемый годовой объем производства и реализации, шт.;
 $P_{\text{м}}$ – затраты на материалы на единицу изделия, р.

2. Определяется годовая потребность в комплектующих изделиях по формуле (7.8).

$$\Pi_{\text{к}} = P_{\text{к}} \cdot N_{\text{п}}, \quad (7.8)$$

где $N_{\text{п}}$ – прогнозируемый годовой объем производства и реализации, шт.;
 $P_{\text{к}}$ – затраты на комплектующие изделия на единицу продукции, р.

3. Вычисляются инвестиции в прирост собственного оборотного капитала в процентах от годовой потребности в материалах и комплектующих изделиях – β (исходя из среднего уровня по экономике: 20–30 %) по формуле (7.9).

$$И_{\text{с.о.к}} = \beta \cdot (\Pi_{\text{м}} + \Pi_{\text{к}}), \quad (7.9)$$

Расчет инвестиций в прирост собственного оборотного капитала представлен в таблице 7.9.

Таблица 7.9 – Расчет инвестиций в прирост собственного оборотного капитала

Наименование статьи затрат	Формула/таблица для расчета	Сумма, р.
1. Годовая потребность в материалах	Формула (7.7)	33060,00
2. Годовая потребность в комплектующих изделиях	Формула (7.8)	101094,00
Инвестиции в прирост собственного капитала	Формула (7.9)	26830,80

7.4 Расчет показателей экономической эффективности инвестиций в проектирование и производство аппаратно-программного комплекса

Оценка экономической эффективности разработки и производства нового изделия зависит от результата сравнения инвестиций в производство нового изделия (инвестиции в разработку и прирост собственных оборотных средств) и полученного годового прироста чистой прибыли.

Сумма инвестиций меньше суммы годового экономического эффекта, то есть инвестиции окупятся менее чем за год, оценка экономической

эффективности инвестиций в производство нового изделия осуществляется на основе расчета рентабельность инвестиций (затрат) по формуле (7.10).

$$ROI = \frac{\Delta\Pi_{\text{ч}} - (I_{\text{р}} + I_{\text{с.о.к}})}{I_{\text{р}} + I_{\text{с.о.к}}} \cdot 100\% \quad (7.10)$$

где $\Delta\Pi_{\text{ч}}$ – прирост чистой прибыли от производства и реализации новых изделий, р.;

$I_{\text{р}}$, $I_{\text{с.о.к}}$ – инвестиции в разработку нового изделия и прирост собственного оборотного капитала, р.

$$ROI = \frac{75518,40 - (38833,88 + 26830,80)}{38833,88 + 26830,80} \cdot 100\% = 15,01\%$$

Сравнивая инвестиции в разработку изделия и прирост собственных оборотных средств, с приростом годовой чистой прибыли можно сделать вывод, что инвестиции окупаются в течении года.

Таким образом, рентабельность инвестиций в разработку и производство данного комплекса превышает ставки по долгосрочным депозитам в белорусских рублях на момент расчетов, что свидетельствует об экономической эффективности инвестиций. Следовательно, производство аппаратно-программного комплекса «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением» является экономически эффективным, инвестиции в его разработку целесообразны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе прохождения преддипломной практики была разработана основная часть аппаратно-программного комплекса «Беспилотный летательный аппарат с дистанционным управлением». Был проведен обзор элементной базы устройства и выбраны конкретные модели, с помощью которых был разработан контроллер полёта летательного устройства. Помимо этого, было написано программное обеспечение для управления летательным аппаратом и рассчитаны показатели экономической эффективности разрабатываемого комплекса.

Проделанная работа станет отличным фундаментом для дальнейшей разработки комплекса. Заложена гибкая и расширяемая архитектура, которая позволит по мере необходимости расширять и дополнять систему дополнительными компонентами. В планах выполнить тестирование и провести испытания разработанной системы, а также доработать программное обеспечение для более стабильной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1] Вычислительные машины, системы и сети: дипломное проектирование (методическое пособие) [Электронный ресурс] : Минск БГУИР 2019. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_136308.pdf – Дата доступа: 28.09.2022.

[2] Орехов С. Ю., Гайгеров М. А., Бородулин А. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ / Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей №6/2022 – С. 7062–7073.

[3] Мельниченко А. С. Анализ возможностей моделирования и применение регуляторов для управления квадрокоптером / А. С. Мельниченко, В. А. Шель, С. В. Кирильчик // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2015. – №2 (163). – С. 40–49.

[4] Белоконь А.И., Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А. Управление параметрами полёта квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автометрия. – 2013. – № 4. – С. 32–42.

[5] Квадрокоптер MJX Bugs 7 с камерой 4K - MJX-B7 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://mjx-russia.com/product/radioupravlyaemyy-skladnoy-kvadrokopter-mjx-bugs-7-s-kameroj-4k-mjx-b7> – Дата доступа: 05.10.2022

[6] Квадрокоптер DJI Mini 2 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://dji-minsk.by/catalog/kvadrokoptery-dji/kvadrokopter_dji_mini_2/ – Дата доступа: 08.10.2022

[7] Квадрокоптер SYMA X56W-P [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://dronomania.ru/syma/x56w-p.html> – Дата доступа: 11.10.2022

[8] ATMEGA328P-AU [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://ru.findic.com/compare/atmega328p-au-vs-atmega328p-mu-O8GoGX208.html> – Дата доступа: 17.10.2022

[9] ATmega328/P datasheet [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/549/DOC001549488.pdf> – Дата доступа: 17.10.2022

[10] ATMEGA328-AU Intel / Altera [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/392280/ATMEL/ATMEGA328-AU/155/1/ATMEGA328-AU.html> – Дата доступа: 17.10.2022

[11] STM32F103 datasheet [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/235/DOC000235733.pdf> – Дата доступа: 19.10.2022

- [12] ESP32-D0WDQ6-V3 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.compel.ru/infosheet/ESPRES/ESP32-D0WDQ6-V3> – Дата доступа: 23.10.2022
- [13] ESP32 Series Datasheet [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf – Дата доступа: 23.10.2022
- [14] NRF24L01 Datasheet (PDF) – List of Unclassified Manufacturers [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1243924/ETC1/NRF24L01.html> – Дата доступа: 28.10.2022
- [15] Радиомодуль nRF24L01 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://robototehnika.ru/content/article/radiomodul-nrf24l01-chast-1-obzor/> – Дата доступа: 28.10.2022
- [16] HC-12 Datasheet [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1242982/ETC1/HC-12.html> – Дата доступа: 30.10.2022
- [17] Радиомодуль HC-12 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/radiomodul-hc-12/> – Дата доступа: 30.10.2022
- [18] MPU-6050 GY-521 гироскоп и акселерометр [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://duino.ru/MPU-6050-giroskop-i-akselerometr.html> – Дата доступа: 02.11.2022
- [19] Десятиосный модуль положения GY-91 (MPU-9250 + BMP280) [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://ardmag.ru/arduino-sensors/2677.html> – Дата доступа: 04.11.2022
- [20] GY-91 10DOF гироскоп + акселерометр + магнитометр + барометр/термометр MPU-9250 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.robostore.com.ua/gy-91-10dof-giroskop-akselerometr-magnitometr-barometr-termometr-mpu-9250/> – Дата доступа: 04.11.2022
- [21] GY-9255 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://radioled.com/image/catalog/pdf/GY-9255.pdf> – Дата доступа: 07.11.2022
- [22] PS-MPU-9255 datasheet [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://stanford.edu/class/ee267/misc/MPU-9255-Datasheet.pdf> – Дата доступа: 07.11.2022
- [23] Датчик давления и температуры BMP180 (Digital Pressure Sensor) [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://roboshop.spb.ru/index.php?route=product/product/download&product_id=131&download_id=225 – Дата доступа: 10.11.2022
- [24] BMP280 datasheet [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://robot-kit.ru/wa-data/public/blog/download/BST-BMP280.pdf> – Дата доступа: 13.11.2022

[25] Модуль GY-BMP280-3.3 датчик атмосферного давления и температуры [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://robot-kit.ru/3077/> – Дата доступа: 13.11.2022

[26] NEO-6 u-blox 6 GPS Modules datasheet [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf – Дата доступа: 20.11.2022

[27] GPS-модуль NEO-6M [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/gps-modul-neo-6m/> – Дата доступа: 23.11.2022

[28] ATGM336H-5N module Datasheet [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.icofchina.com/d/file/xiazai/2016-12-05/b5c57074f4b1fcc62ba8c7868548d18a.pdf> – Дата доступа: 27.11.2022

[29] ATGM336H, Модуль GPS UART 3.3-5V [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://umnaya-elektronika.ru/svyaz/gps/atgm336h-modul-gps-uart-3.3-5v/> – Дата доступа: 29.11.2022

[30] Щеточные и бесщеточные двигатели квадрокоптеров: свойства, различия, плюсы и минусы [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://dronnews.ru/o-dronakh/dvigateli-kvadrocopteroov.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F – Дата доступа: 02.12.2022

[31] Бесколлекторный двигатель EMAX RS1408 2300KV-3600KV для гоночного квадроцикла Micro FPV [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://emaxmodel.com/products/emax-rs1408-2300kv-3600kv-brushless-motor-for-micro-fpv-racing-quad> – Дата доступа: 08.12.2022

[32] Купить EMAX бесщеточный двигатель EMAX RS1408 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://aliexpress.ru/item/32977111063.html?sku_id=66771168187 – Дата доступа: 09.12.2022

[33] SKYSTARS KOKO 1404 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://ru.banggood.com/SKYSTARS-KOKO-1404-3000KV-6S-3800KV-or-4600KV-4S-Brushless-Racing-Motor-For-Long-Rang-FPV-Racing-2_5inch-4inch-Toothpick-RC-Drone-p-1897433.html?cur_warehouse=CN&ID=517763 – Дата доступа: 11.12.2022

[34] Купить SKYSTARS KOKO 1404 3000KV [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://aliexpress.ru/item/1005002967385400.html?sku_id=12000023003484511 – Дата доступа: 11.12.2022

[35] Бесколлекторные моторы HappyModel EX1102 9000KV [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://flymod.net/item/ex1102_kv9000 – Дата доступа: 12.12.2022

[36] Купить HappyModel EX1102 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://aliexpress.ru/item/33010772549.html?sku_id=67114365055 – Дата доступа: 13.12.2022

[37] Купить EMAX 1104 4300KV [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://aliexpress.ru/item/1005002190328136.html?sku_id=12000019002391933 – Дата доступа: 14.12.2022

[38] Купить Бесщеточный двигатель LD-Power 1106 4200KV [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://aliexpress.ru/item/1005003385186703.html?sku_id=12000025534470448 – Дата доступа: 15.12.2022

[39] Как выбрать регулятор скорости для квадрокоптера [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://blog.rcdetails.info/kak-vybrat-regulyator-hoda-dlya-gonochnogo-kvadrokoptera/> – Дата доступа: 18.12.2022

[40] ESC регуляторы оборотов, что это, как они работают и как выбрать [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://profpv.ru/esc-regulatory-oborotov-chto-eh-to-kak-oni-r/> – Дата доступа: 19.12.2022

[41] Hobbywing XRotor Micro 45A 4-in-1 3-6S BLHeli_S32 ESC [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://rcdrive.ru/unit.php?unit=29608> – Дата доступа: 24.12.2022

[42] Flycolor Raptor 30A BLS Pro [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://rcsearch.ru/-c1712?page=2> – Дата доступа: 26.12.2022

[43] Регулятор скорости 4 в 1 T-Motor Velox V45A V2 BLHeli_32 Dshot 1200 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://flymod.net/item/tmotor_velox_v45a – Дата доступа: 29.12.2022

[44] Архитектура микроконтроллера ATmega328P [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://ppt-online.org/149556> – Дата доступа: 04.01.2023

[45] Обзор модуля GY-521 (MPU-6050) [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://robotchip.ru/obzor-modulya-gy-521/> – Дата доступа: 12.01.2023

[46] Обзор датчика давления BMP180 (BMP080) [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://robotchip.ru/obzor-datchika-davleniya-bmp180/> – Дата доступа: 13.01.2023

[47] nRF24L01+ [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://micro-pi.ru/nrf24l01-spi-модуль-беспроводной-связи/> – Дата доступа: 18.01.2023

[48] Радио модуль NRF24L01 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/radio-modul-nrf24l01/> – Дата доступа: 20.01.2023

[49] Главное отличие цветных светодиодов [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://schip.com.ua/glavnoe-otlichie-czvetnyh-svetodiodov/> – Дата доступа: 25.01.2023

[50] Как выбрать регулятор скорости для гоночного квадрокоптера [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://rcdetails.info/kak-vybrat-regulyator-hoda-dlya-gonochnogo-kvadrokoptera/> – Дата доступа: 29.01.2023

[51] Добавление внешней памяти EEPROM в Ардуино [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.joyta.ru/13126-dobavlenie-vneshnej-pamyati-eprom-v-arduino-24lc256/> – Дата доступа: 29.01.2023

[52] Расширитель GPIO MCP23017 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://kotyara12.ru/iot/mcp23017/> – Дата доступа: 02.02.2023

[53] Микросхема CH340G – преобразователь интерфейса USB в UART (мост USB-UART) [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://mypractic.ru/mikrosxema-ch340g-preobrazovatel-interfejsa-usb-v-uart-most-usb-uart-xarakteristiki-usloviya-ekspluatacii-tipovye-sxemy-vklyucheniya> – Дата доступа: 06.02.2023

[54] Подключение ST7735S к Arduino [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://arduino-ide.com/modules/32-podkljuchenie-st7735s-k-arduino.html> – Дата доступа: 10.02.2023

[55] TP4056 - контроллере зарядки Li-ion аккумуляторов [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://beriled.biz/data/files/tp4056new.pdf> – Дата доступа: 17.02.2023

[56] Интерфейсная шина (I2C) [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.rotr.info/electronics/interface/spi/spi.htm> – Дата доступа: 23.02.2022

[57] SPI [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://easyelectronics.ru/interface-bus-iic-i2c.html> – Дата доступа: 29.02.2022

[58] UART [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/109395/> – Дата доступа: 04.03.2022

[59] Enhanced ShockBurst User Guide [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fcom.nordic.infocenter.sdk5.v12.0.0%2Fesb_users_guide.html – Дата доступа: 12.03.2022

[60] FSK, GFSK, MSK, GMSK и некоторые другие режимы [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.radioscanner.ru/info/article345/> – Дата доступа: 16.03.2022

[61] Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://ledjournal.info/spravochnik/shirотно-impulsnaya-modulyaciya.html> – Дата доступа: 21.03.2022

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

Вводный плакат

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)

Схема электрическая структурная

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Схема электрическая функциональная