

Аннотация.

Объем 52 с., 38 рис., 4 табл., 20 источников

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ВЕРТОЛЁТНОГО ТИПА

Объектом исследования является система управления беспилотным летательным аппаратом вертолётного типа.

Цель бакалаврской работы заключается в создании системы управления вертолётной конструкции, демонстрирующей уровень подготовки выпускников кафедры "Промышленная электроника", Тольяттинского государственного университета. Задачи: выбрать беспроводной способ передачи информации; выбрать блок управления и силовую часть управления; разработать алгоритмы управления периферийными устройствами, считывания и обработки данных и взаимодействия с пользователем; исследовать разработанную систему; разработать печатную плату.

Работа состоит из двух глав, в которых решены упомянутые задачи.

Для расчета и проектирования электрической схемы и печатной платы использовались программные пакеты: Компас-3D, Diptrace.

Разработка программного обеспечения проводилась в средах: ArduinoIDE, Unity 3D.

Степень внедрения — устройство по разработанной документации является опытным образцом.

Областями применения данной системы являются: исследовательская, развлекательного характера и пр.

Применение в устройстве Wi-Fi передачи данных и приложения под смартфон с ОС Android позволило убрать специализированный пульт управления. Кроме того, применение модуля определения положения в пространстве добавило возможность создания автономной системы управления на базе данного устройства.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Состояние вопроса.....	5
1.1 Анализ технической проблемы и поиск аналогов	5
1.2 Требования к устройству.....	9
1.3Выбор способа беспроводной передачи информации между мобильным устройством и системой управления.....	9
1.4Выбор блока управления.....	10
1.5Выбор силовой части системы управления.....	19
2 Расчетно - проектный раздел.....	25
2.1 Установка драйвера CH340G на Windows7.....	25
2.2Программирование Wi-Fi модуля ESP8266.....	27
2.3 Разработка алгоритма управления периферийными устройствами....	29
2.4 Разработка алгоритма считывания и обработки данных.....	31
2.5 Разработка алгоритма взаимодействия с пользователем.....	34
3Экспериментальный раздел.....	35
3.1Влияние частоты ШИМ на скорость вращения приводов.....	35
3.2Дальность приёма-передачи беспроводной связи Wi-Fi модуля.....	39
3.3Настройка управления вертолётom.....	40
4Конструкторско-технологический раздел	41
4.1Разработка печатной платы.....	41
5 Экономический раздел.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	49
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	50

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (далее БПЛА) применяются в настоящее время все чаще[1]. Увеличивается количество областей применения: реклама, фото и видео съёмка, разведывательные и спасательные работы, развлечения и т.д. Существует много видов БПЛА и их конструкций. Они отличаются количеством приводов и их расположением. В данной работе рассматривается летательный аппарат вертолётного типа. Это связано с наличием данного БПЛА и возможностью изготовления системы управления для него. Таким образом, цель данной бакалаврской работы заключается в разработке системы управления, с небольшим изменением функционала – ручное управление аппаратом с мобильного устройства на базе Android.

Данная работа достаточно обширна, для более ясного понимания конечного «продукта» необходимо сформировать задачи.

1. Изучить специальную литературу по проблеме исследования.
2. Выбрать способ беспроводной передачи информации между мобильным устройством и системой управления
3. Выбрать блок управления
4. Выбрать силовую часть
5. Разработать систему управления БПЛА

1 Состояние вопроса

1.1 Анализ технической проблемы и поиск аналогов

Соосная конструкция летательного аппарата вертолётного типа Syma S033 имеет ряд отличий в построении системы управления по отношению к другим роторным моделям[2]. Приводы основных лопастей вращаются в противоположные стороны, при этом каждый привод крутится только в одну сторону. Хвостовому приводу необходимо вращение в обоих направлениях. Это связано с особенностью устройства данной модели: подъемная сила возникает при вращении основных лопастей, при этом управление вращением в горизонтальной плоскости производится теми же центральными приводами за счёт разницы скоростей.

Хвостовой двигатель не играет роль в стабилизации, а только лишь задаёт необходимый тангаж вращением лопасти в одном из направлений, позволяя летательному аппарату двигаться вперёд или назад. После того, как вертолёт изменил угол наклона, его перемещению способствуют нижние центральные лопасти.

Для стабилизации вертолёта после отключения хвостового привода к верхним лопастям соосной схемы закреплена балансирующая рейка. При достаточной скорости вращения лопастей балансирующая рейка сохраняет положение относительно земли и придаёт компенсирующий угол вращения для верхних лопастей соосной схемы.

В данной конструкции в качестве приводов используются двигатели постоянного тока с фиксированным шагом. Передаточные шестерни снижают нагрузку на приводы и увеличивают скорость реакции летательного аппарата. Внешний вид конструкции представлен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Вертолёт SymaS033

Системы управления БПЛА как правило разрабатываются без открытого доступа к алгоритмам программ и расчётам конструкций. Однако, в последние годы набирает популярность создание собственных БПЛА «с нуля». Разработчики выкладывают всю необходимую информацию на форумах, сайтах и в «блогах».

Анализ информации в интернете и сравнения цен на компоненты помог определиться с блоком управления. Ниже представлена информация о некоторых готовых платформах. Данные платформы уже имеют всё необходимое аппаратное и программное обеспечение. Однако их цена достаточно высока для данного аппарата.

Lisa/MXV2.1 Autopilot

Внешний вид контроллера (Рисунок 1.2) и его основные характеристики представлены ниже [3]:

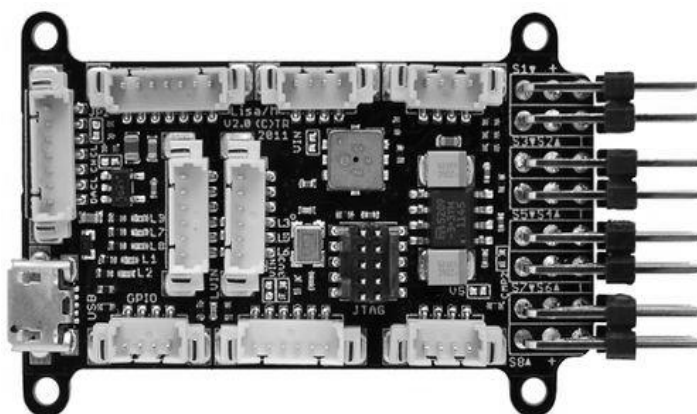


Рисунок 1.2 – Lisa/MXV2.1 Autopilot

Основные характеристики:

- Lisa/MXV2.1 AutopilotSTM32F4 168МГц ARMCortex-M4

микроконтроллер

- 1 Мбайт флэш-памяти
- (192+4) Кбайта криптографическое ускорение: аппаратное ускорение AES 128, 192 , 256, Triple DES , HASH (MD5 , SHA -1), и HMAC
- 3-осевой гироскоп
- 3-осевой акселерометр
- 3-осевой магнетометр
- барометр
- I2C 5V
- TTL для радиоканала и GPS
- Высокоскоростной SPI
- USB порт
- 8 ШИМ-выводов для приводов
- Средняя цена: 200\$

ArduPilot Mega (APM) 2.6

Внешний вид контроллера (Рисунок 1.3) и его основные характеристики представлены ниже [4]:

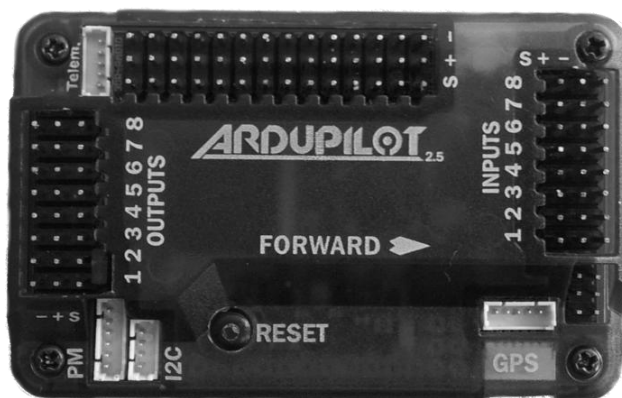


Рисунок 1.3 – Внешний вид ArduPilot Mega (APM) 2.6

- Трёх осевые гироскоп, акселерометр, магнитометр (до 2.5.2) и высокоточный барометр

- Система стабилизации с возможностью воздушной акробатики
- Удержание позиции по GPS, полет по точкам и возврат на точку старта
- Возможность использования инфракрасного датчика для обхода препятствий

- Поддержка ультразвукового датчика (Sonar sensor) для автоматического взлета и посадки

- Автоматическое следование по маршрутным точкам
- Управление двигателями посредством ШИМ (PWM) с использованием дешевых регуляторов скорости (ESC)

- Собственная система стабилизации для камеры (функция контроллера подвеса)

- Радиосвязь и телеметрия с борта
- Поддержка множества рам и конфигураций летающих и едущих аппаратов

- Поддержка датчика уровня заряда батареи
- Настраиваемая световая индикация при полетах
- Совместим с многими радиоуправляемыми приемниками PWM и PPM сигналов

- Передача в реальном времени телеметрических данных
- Поддержка OSD телеметрии (наложение на видео передачу телеметрических данных) используя протокол MAVLINK

- Конфигурирования точек полета посредством GoogleMaps
- Бортовая флеш-память 16Мбит для автоматической регистрации данных
- Цифровой компас работает на HMC5883L (до версии 2.5.2)
- 6 степеней свободы в InvenSense акселерометр, гироскоп MPU-6000

- Датчик барометрического давления обновлен до MS5611-01BA03, от MeasurementSpecialties
- Контроллер Atmel ATmega2560-16AU и ATMEGA32U-2 чип для обработки и функции USB
- Возможно загрузка обновлений встроенного программного обеспечения и конфигурации
- Средняя цена: 170\$

1.2 Требования к устройству

Проектируемая система управления для имеющегося БПЛА ограничена некоторыми параметрами:

1. Цена
2. Вес

Под ценовым параметром мы понимаем, необходимость наименьшей стоимости конечного продукта. А весовой параметр нами рассматривается как отношение мощности приводов к весу конструкции.

Принимая во внимание данные аспекты, стоит спроектировать систему управления в соответствии со сферой применения. Так как данный аппарат развлекательного характера, то исключаются: камера видео и фото съемки, GPS-приёмник, мощные микропроцессоры.

1.3 Выбор способа беспроводной передачи информации между мобильным устройством и системой управления.

Большинство из пользователей мобильных устройств на базе Android знают, что Wi-Fi и Bluetooth являются беспроводными стандартами связи и используют для передачи данных определенные радиочастоты. Назначение таких устройств одинаковое — это организация передачи данных. Однако расстояние, которое покрывает Bluetooth-технология значительно меньше, чем у Wi-Fi. Ещё одним

аргументом будет то, что не каждое Android-устройство имеет на своём «борту» Bluetooth.

Технология Wi-Fi, согласно приказу № 124 «Об утверждении Правил применения оборудования радиодоступа», от 14.09.10, имеет полосы частот, лицензия на которые не требуется на территории РФ [4]. Частотный диапазон 2,4ГГц можно использовать без постановки на учёт в специальных органах, если мощность передатчика не превышает 100мВт (20дБм) для устройства стандарта IEEE 802.11 b. Так же без постановки на учет можно легально пользоваться устройствами со стандартами IEEE 802.11 g, IEEE 802.11 n, в том случае, если мощность, излучаемая передатчиком, меньше 250мВт (24дБм). В телефонах используются именно эти стандарты, а мощность передатчика не превышает установленную законом.

1.4 Выбор блока управления

Учитывая небольшую нагрузку на полётный контроллер и множество примеров работ, выбор пал на недорогую платформу Arduino. В Китае был сделан заказ клона оригинальной платформы ArduinoUNOR3 (Внешний вид показан на рисунке 1.4) [5].

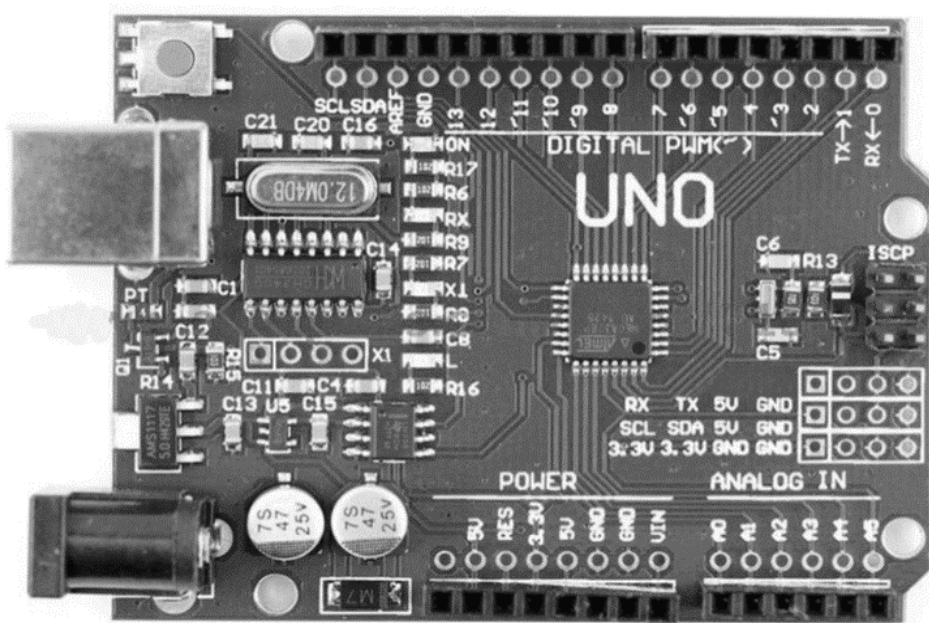


Рисунок 1.4 – Внешний вид клона ArduinoUNOR3

Характеристики:

- Микроконтроллер ATmega328P-AU
- Рабочее напряжение контроллера 5В
- Рекомендуемое напряжение внешнего питания 7-12В
- Предельное напряжение внешнего питания 6-20В
- 14 цифровых портов, могут использоваться для ввода/вывода. 6 портов

поддерживают ШИМ

- 6 аналоговых портов
- Максимальный ток порта ввода/вывода 40 мА
- Максимальный выходной ток порта 3.3V: 50 мА
- Flash-память 32 КБ, из которых 0.5 КБ используются загрузчиком
- Внутренняя память 2 КБ
- EEPROM-память 1 КБ
- Тактовая частота 12 МГц

Клон Arduino UNO R3 оснащён чипом CH340G для связи с ПК [6].

Описание CH340G:

- Полноценный переходник USB – COM-порт (RS232) с уровнями TTL/CMOS и линиями: TxD, RxD, DTR, CTS
- Поддержка драйверов Windows XP, Windows 7, Windows 8, Mac OS, Linux
- Поддержка USB 2.0
- Скорость передачи данных от 50 бит/с до 2 Мбит/с
- Поддержка интерфейсов RS232, RS485, RS422
- Программное обеспечение полностью совместимо с CH341
- Поддержка питания 5В и 3.3В

Так как у Arduino UNO R3 нет Wi-Fi передатчика, то поиск в интернете дал возможность повысить надёжность системы управления, добавив Wi-Fi модуль ESP8266 с программируемым микроконтроллером на «борту», тем самым

отделить алгоритмы управления от обработки и передачи данных[7]. Его внешний вид показан на рисунке 1.5.

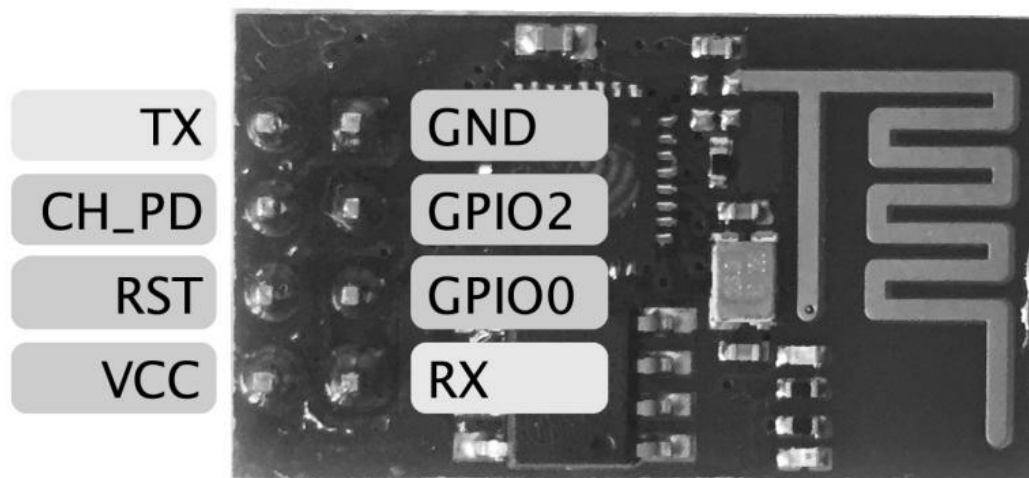


Рисунок 1.5 – Внешний вид Wi-Fi модуля ESP8266

Характеристики[8]:

- Протокол 802.11 b/g/n
- Доступ Wi-Fi Direct (P2P), доступ soft-AP
- Встроенный стек TCP/IP
- Встроенный TR переключатель, LNA, усилитель мощности поиска сети
- Встроенный PLL, регуляторы и система управления питанием
- Выходная мощность +19.5 дБ в режиме 802.11b
- Встроенный датчик температуры
- Поддержка различных антенн
- Протекание тока в выключенном состоянии не более 10 мкА
- В качестве функционального процессора может использоваться

встроенный маломощный 32-битный процессор

- SDIO 2.0, SPI, UART
- STBC, 1×1 MIMO, 2×1 MIMO
- A-MPDU&A-MSDU агрегирование & 0.4мкс интервал защиты
- Пробуждение и отправка пакетов менее чем через 2 мс
- Потребление в режиме Standby до 1 мВт (DTIM3)

Частота работы микропроцессора 50 МГц, что в несколько раз превышает частоту работы микропроцессора ArduinoUNOR3. Тем самым, было принято решение перенести «тяжёлые» вычисления на данный модуль и повысить стабильность полётного контроллера.

Для связи с ПК и дальнейшем программировании ESP8266 самый простой способ – это использовать тот же чип CH340G. Но проблема в том, что данный чип в ArduinoUNOR3 использует 5В логику. Тем временем модульESP8266 не толерантный к ней и работает только на 3.3В логике.

После анализа данной области, для согласования логических уровней напряжения, была применена наиболее надёжная схема на полевых МДП-транзисторах[9]. Она изображена на рисунке 1.6.

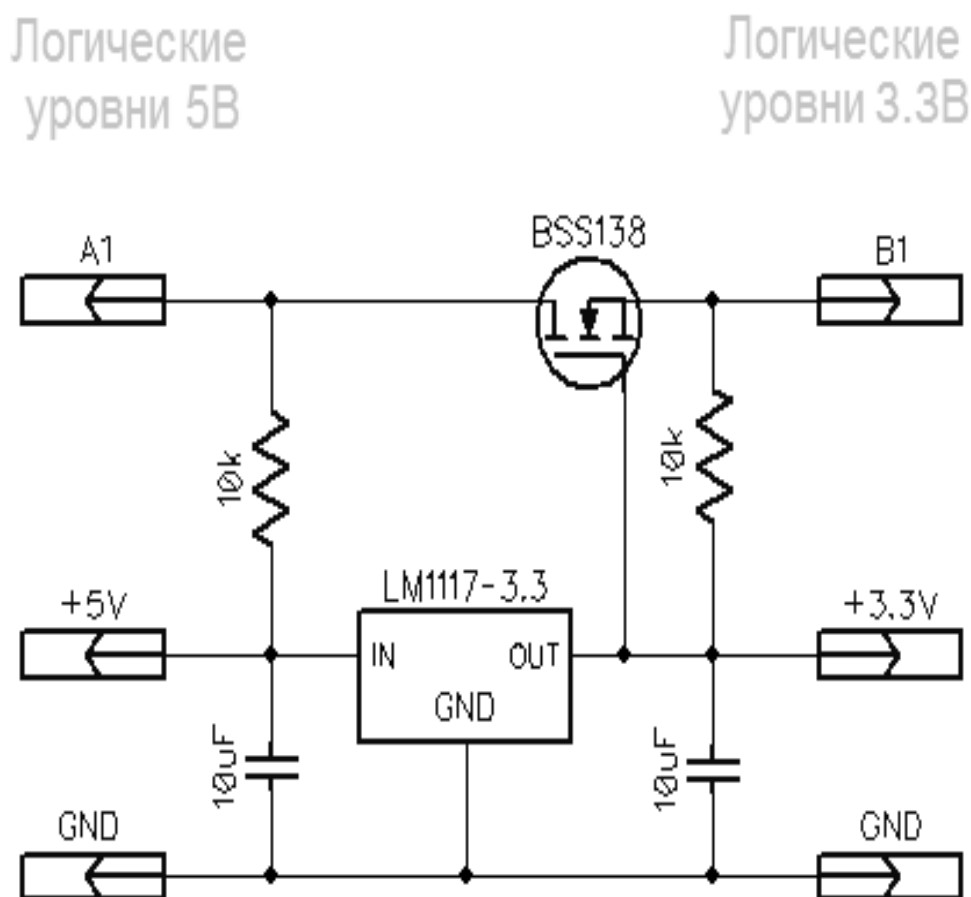


Рисунок 1.6 – Схема согласования логических уровней напряжения

Особенности схемы:

1. Двухнаправленность, для возможности использовать распространенные интерфейсы
2. Встроенный стабилизатор напряжения для запитывания 3-х вольтовых микросхем прямо от модуля
3. Небольшие габариты для возможности макетирования на breadboard
4. Минимум компонентов с распространенными комплектующими

Адаптировав данное решение под свои нужды, выполнили схему питания Wi-Fi модуля и согласования логических уровней напряжений для его связи с ArduinoUNO (Рисунок 1.7).

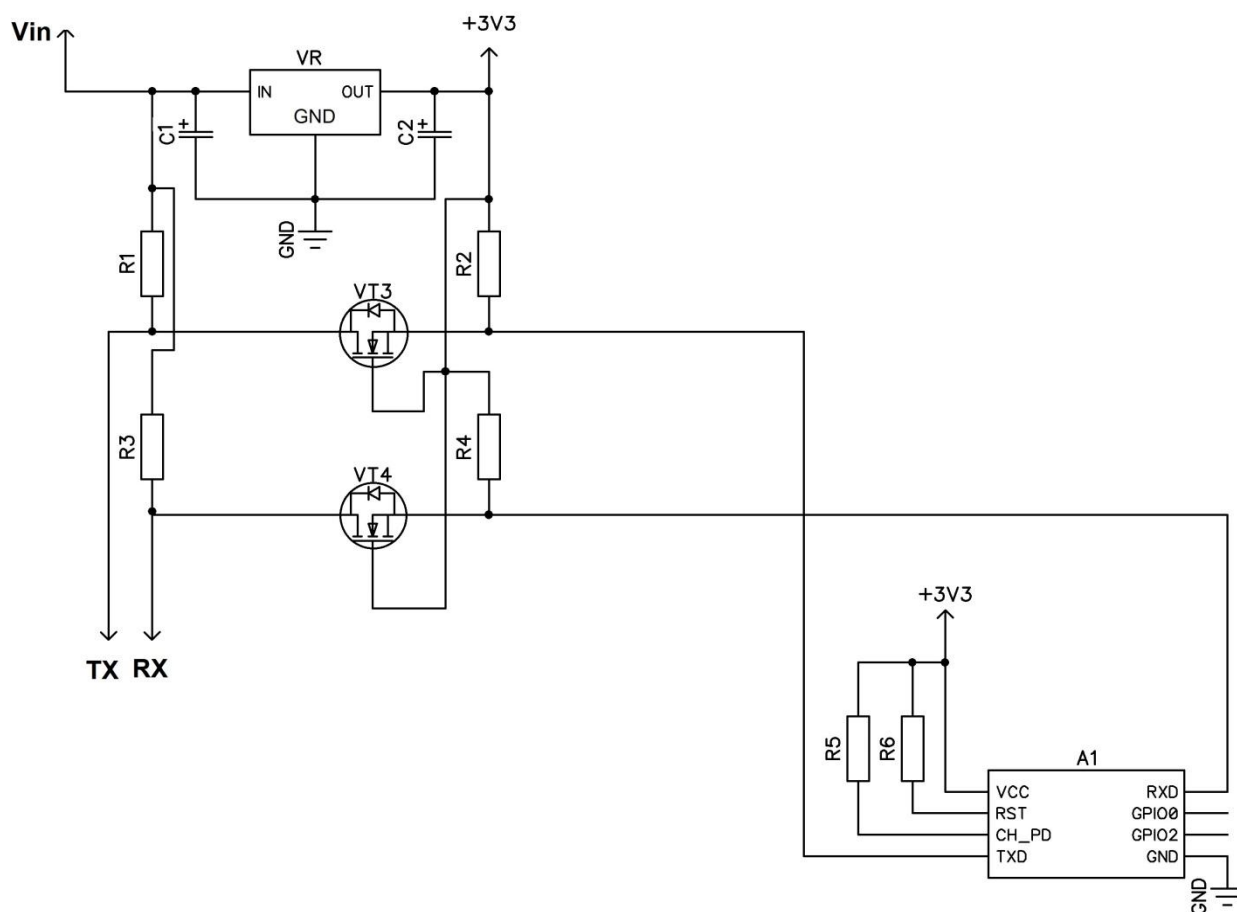


Рисунок 1.7 – Схема питания ESP8266 и согласования с ARDUINOUNOR3

Для дальнейшего расширения функций БПЛА необходимо устройство определения положения в пространстве. Рассмотрев некоторые варианты, нами был

выбран модуль GY-88, внешний вид которого показан на рисунке 1.8. Он содержит гироскоп и акселерометр в микросхеме MPU6050, барометрический датчик BMP085, а также магнитометр HMC5883L. Данные устройства достаточно распространены и часто используются в открытых проектах для определения положения в пространстве. Данный модуль прост в подключении и настройке, так как для него существует множество библиотек.

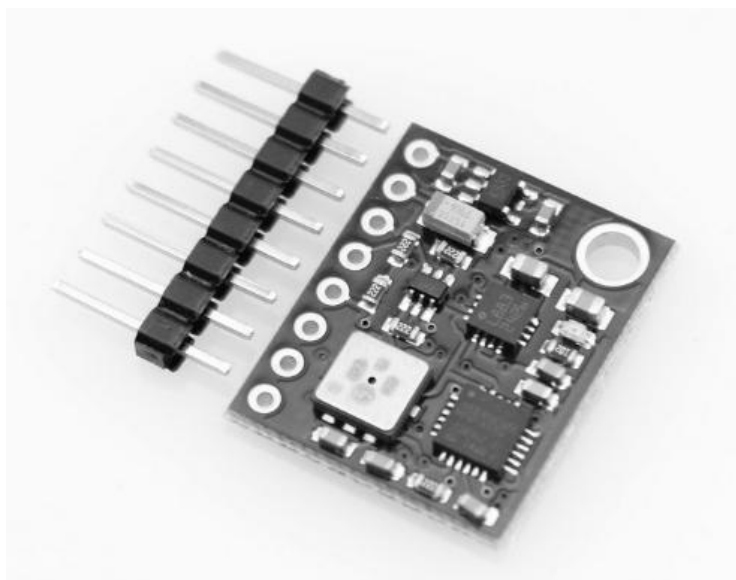


Рисунок 1.8 – Внешний вид модуля GY-88

Рассмотрим характеристики датчиков подробнее для более детального понимания возможностей данного модуля положения в пространстве.

Характеристики MPU6050 [10]:

Особенности гироскопа

Трехосный МЭМС гироскоп в MPU-60X0 включает в себя широкий спектр функций:

- Цифровой выход X-, Y- и Z-осевых датчиков угловой скорости (гироскопов) с программируемым полномасштабным диапазоном ± 250 , ± 500 , ± 1000 и ± 2000 ° / сек
- Внешний сигнал синхронизации, подключенный к контакту Fsync, поддерживает изображения, видео- и GPS-синхронизацию

- Встроенные 16-разрядные АЦП позволяют одновременное осуществление выборки гироскопов
- Повышенная стабильность смещения и температурной чувствительности снижает потребность в пользовательской калибровке
- Улучшенная производительность фильтра низкочастотного шума
- Программируемый фильтр низких частот
- Рабочий ток гироскопа: 3,6 мА
- Ток в режиме ожидания: 5 мкА
- Откалиброванный точный коэффициент масштабирования
- Пользовательская диагностика

Особенности акселерометра

Трехосевой МЭМС акселерометр в MPU-60X0 включает в себя широкий спектр функций:

- Цифровой выход 3-х осей акселерометра с программируемым полномасштабным диапазоном $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ и $\pm 16g$
- Встроенные 16-битные АЦП позволяют одновременное осуществление выборки акселерометров без внешнего мультиплексора
- Стандартный рабочий ток акселерометра: 500 мкА
- Ток акселерометра в режиме малой мощности: 10 мкА на 1.25 Гц, 20 мкА на 5 Гц, 60 мкА на 20 Гц, 110 мкА на 40 Гц
- Определение ориентации и сигнализация
- Чувствительность
- Программируемые пользователем прерывания
- High-G прерывания

- Пользовательская диагностика

Дополнительные особенности:

- 9-осевой MotionFusion, контролируемый процессором Digital Motion Processor (DMP)
- Дополнительная ведущая шина I2C для чтения данных с внешних датчиков (например, магнитометр)
- Рабочий ток 3.9 мА при включении всех 6 осей движения и DMP
- Диапазон напряжения питания VDD 2.375В - 3.46В
- Гибкий VLOGIC опорного напряжения поддерживает несколько напряжений интерфейса I2C (только в MPU-6050)
- Самая маленькая и самая тонкая QFN-микросхема для портативных устройств: 4x4x0.9мм
- Минимальное взаимовлияние между осями акселерометра и гироскопа
- 1024 байта FIFO-буфера снижают энергопотребление, позволяя процессору считывать данные в мгновенном режиме, а затем переходить в режим пониженного энергопотребления в то время, как MPU собирает больше данных.
- Цифровой выход датчика температуры
- Программируемые пользователем цифровые фильтры для гироскопа, акселерометра и датчика температуры
- Устойчивость к воздействиям до 10000g
- 400 кГц FastModeI2C для общения со всеми регистрами
- 1 МГц последовательный интерфейс SPI для связи со всеми регистрами (только в MPU-6000)

- 20 МГц последовательный интерфейс SPI для считывания значений и прерываний регистров (MPU-6000 только)

- МЭМС структура герметично запечатана на уровне слоёв
- Соответствие требованиям RoHS

Характеристики HMC5883L [11]:

- 3-осные Магниторезистивные Датчики в корпусе LCC 3.0x3.0x0.9мм поверхностного монтажа

- 12-разрядный АЦП в сочетании с низким уровнем шума AMR датчик достигает 2 мГс разрешения поля в ± 8 Гаусс полей

- Встроенное авто-тестирование

- Низкий уровень напряжения питания (2.16 – 3.6В) и низкое энергопотребление (100 мкА)

- Встроенная схема драйвера

- Цифровой интерфейс I2C

- Без выводная конструкция корпуса

- Широкий диапазон Магнитного поля (± 8 Эрстед)

- Доступная поддержка алгоритмов и программного обеспечения

- 160 Гц максимальная выходная скорость

Характеристики BMP085 [12]:

- Диапазон давлений: 300 ... 1100гПа (+ 9000м ... -500м над уровнем моря)

- Напряжение питания: 1.8 ... 3.6В (VDDA); 1.62 ... 3.6В (VDDD)
- Корпус LCC8: прочный, безвыводной керамический корпус (LCC)
- Малые габариты: 5.0мм x 5.0мм
- Сверхтонкий: 1.2мм
- С низким потреблением питания: 5мкА на 1 измерение / сек. в стандартном режиме
- С низким уровнем шума: 0.06гПа (0.5м) в режиме сверхнизкой мощности; 0.03гПа (0.25м) в режиме с ультравысокой разрешающей способностью; до 0.1м (среднеквадратичного шума)
- Возможность измерения температуры
- Интерфейс I2C
- Полностью откалиброванный
- Без примесей свинца, без галогенов и соответствует стандартам RoHS,
- Уровень MSL 1

1.5 Выбор силовой части системы управления

В качестве центральных приводов в данном аппарате представлены коллекторные двигатели постоянного тока. Точного описания данных двигателей установить не удалось. Из маркировки на корпусе двигателя удалось установить, что номинальное напряжение составляет 7.4В. При тестировании выяснилось, что двигатели потребляют значительные действующие токи порядка 5А на двигатель.



Рисунок 1.9 – Основной привод SymaS033

Учитывая вышеописанные особенности, для центральных приводов выбрана силовая схема управления, которая содержит Mosfet-транзисторы. Управление будет обеспечиваться широтно-импульсной модуляцией. Изменение скважности импульсов управления позволит плавно изменять скорости вращения лопастей. Использование выбранных транзисторов в ключевом режиме позволит значительно снизить потери энергии, а также нагрев элементов силовой части управления основными роторами.

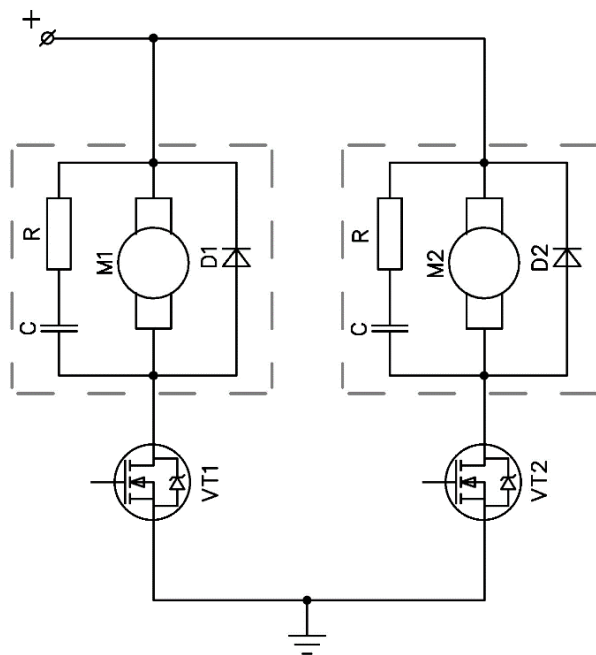


Рисунок 1.10 – Силовая часть схемы для центральных приводов

В качестве хвостового привода представлен коллекторный двигатель постоянного тока. Точного описания двигателя найти не удалось. Поэтому было принято решение считать номинальное напряжение двигателя равное 5В, а номинальный потребляемый ток с запасом порядка 1.5А.



Рисунок 1.11 – Хвостовой двигатель SymaS033

Для управления хвостовым приводом необходима мостовая схема управления [13]. Это позволит вращать двигатель в обоих направлениях с плавной регулировкой скорости. Была применена готовая микросхема L293D. Выбор данного драйвера управления двигателями связан со следующими положительными сторонами:

- Распространённая схема, взаимозаменяемые микросхемы различных производителей;
- Простое управление;
- Достаточно компактный размер.

На рисунке 1.12 приведена функциональная блок-схема драйвера L293 [14]. Схема L293D отличается тем, что внутри уже встроены защитные диоды. Ниже, на рисунках 1.13 и 1.14 приведены части схемы усилителей, находящихся под номерами 1-4 на рисунке 1.12

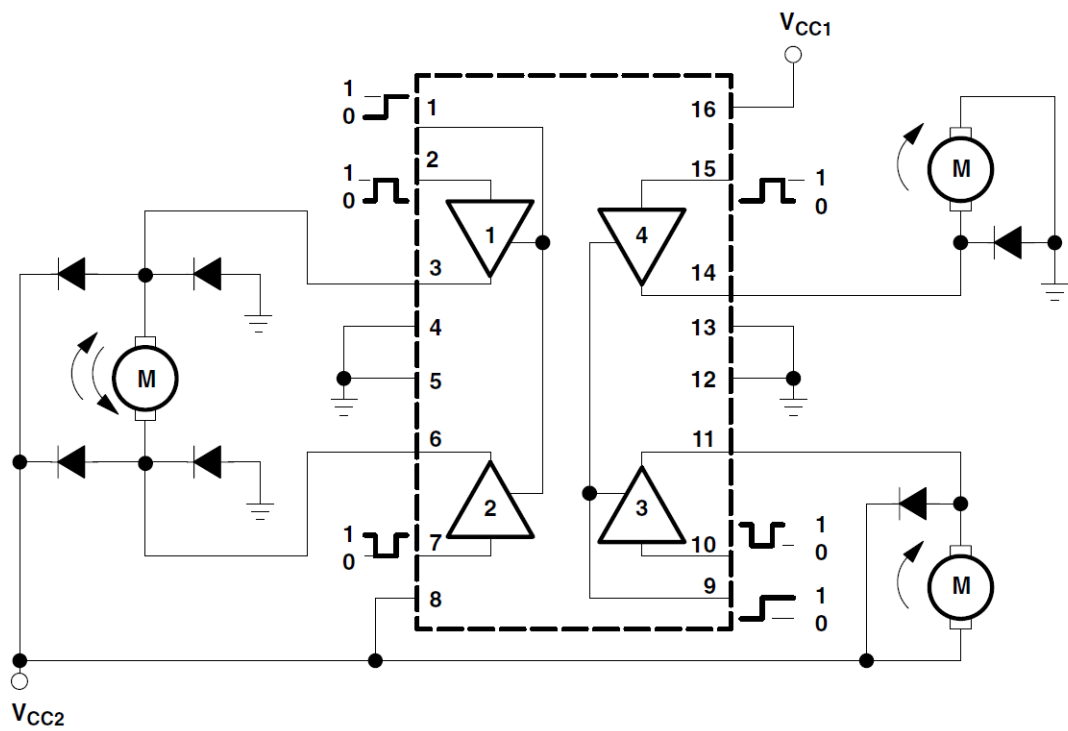


Рисунок 1.12– Функциональная блок схема драйвера L293

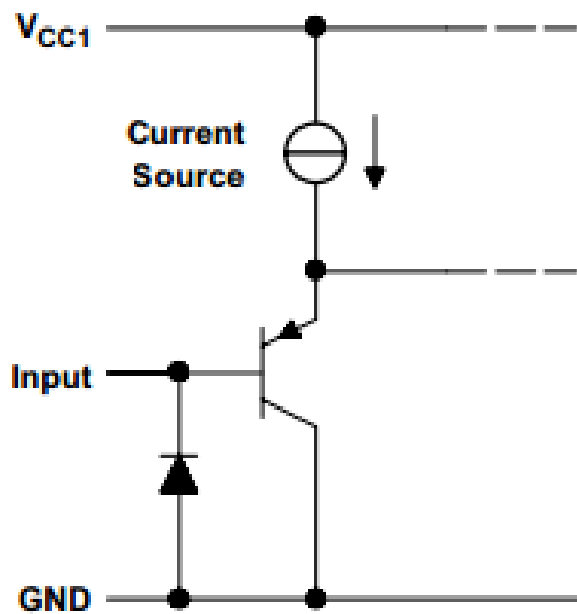


Рисунок 1.13 – Схема порта ввода драйвера L293D

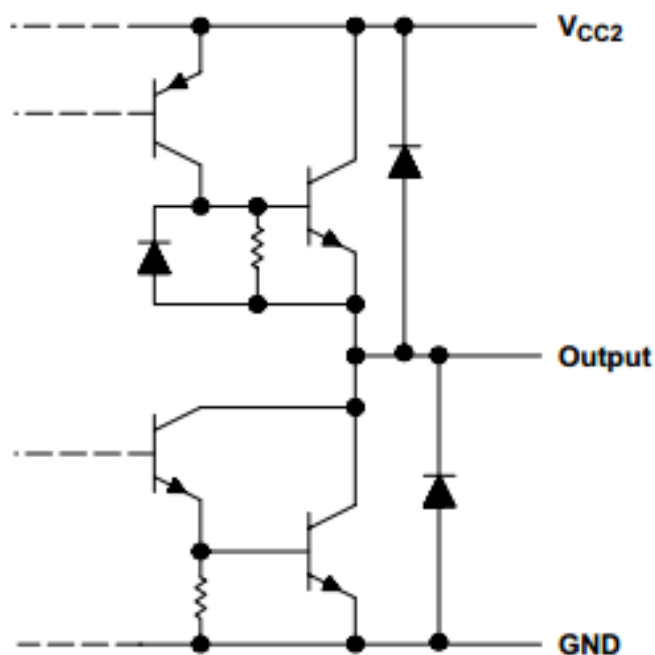


Рисунок 1.14 – Схема порта вывода драйвера L293D

Для питания хвостового двигателя, а также модуля ArduinoUNOR3, необходимо стабилизированное напряжение 5В. В качестве питания рассмотрим линейный стабилизатор напряжения КР142ЕН5А. Отечественный линейный стабилизатор напряжения имеет ряд положительных сторон для применения в данной схеме:

- Компактный размер микросхемы;
- Максимальный ток 2А;
- Распространена в розничной продаже;
- Есть полные аналоги.

Основные характеристики стабилизатора указаны на рисунке 1.15 [15]. Данный линейный стабилизатор удовлетворяет условиям использования в разрабатываемой схеме.

Наименование параметра, режим измерения	Обозначение	Ед. изм.	Значение	
			Min	Max
Выходное напряжение ($U_i = 7,5 \dots 15 \text{ В}$; $I_o = -10 \text{ мА}$; $C_i = 2,2 \text{ мкФ}$; $C_o = 1,0 \text{ мкФ}$)	U_o	В	4,9	5,1
Коэффициент нестабильности по напряжению ($U_i = 7,5 \dots 15 \text{ В}$; $C_i = 2,2 \text{ мкФ}$; $I_o = -10 \text{ мА}$; $C_o = 1,0 \text{ мкФ}$)	K_{ui}	% / В		0,05
Температурный коэффициент нестабильности U_o ($U_i = 7,5 \dots 15 \text{ В}$; $C_i = 2,2 \text{ мкФ}$; $I_o = -10 \text{ мА}$; $C_o = 1,0 \text{ мкФ}$)	α_{Uo}	% / В		0,02
Коэффициент нестабильности по току ($U_i = 8,3 \dots 15 \text{ В}$; $C_i = 2,2 \text{ мкФ}$; $I_o = -1,5 \text{ А}$; $C_o = 1,0 \text{ мкФ}$)	K_{Io}	% / А		1,33
Ток потребления ($U_i = 7,5 \dots 15 \text{ В}$; $C_i = 2,2 \text{ мкФ}$; $C_o = 1,0 \text{ мкФ}$)	I_{cc}	мА		10

Таблица 2. Значения предельно допустимых электрических режимов эксплуатации KP142EH5A

Параметры	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Входное напряжение	U_i	В	15**
Выходной ток при рассеиваемой мощности на корпусе ($P_{tot} \leq P_{tot \max}$)	$I_o \max$	А	1,5*
Рассеиваемая мощность (с теплоотводом)	$P_{tot \max}$	Вт	10,0*
Рассеиваемая мощность (без теплоотвода)	$P_{tot \max}$	Вт	1,5*

* $T_{корп.} = -45 \dots +70 \text{ }^\circ\text{C}$

** $T_{корп.} = -45 \dots +100 \text{ }^\circ\text{C}$

Рисунок 1.15 – Основные характеристики линейного стабилизатора KP142EH5A

Для питания модуля ESP8266 и GY-88 необходимо стабилизированное напряжение 3.3В. Для схемы был подобран распространённый линейный стабилизатор напряжения LM1117-3.3:

- Номинальный выходной ток 0.8А;
- Максимальное входное напряжение 15В;
- Минимальное напряжение входа 4.5В;
- Выходное напряжение 3.3В;
- Падение напряжения вход/выход 1.2В.

2 Расчётно-проектный раздел

2.1 Установка драйвера CH340G на Windows7

После подключения устройства, чип определится как USB 2.0 SERIAL, но Windows7 не сможет установить драйвера. Скриншот диспетчера оборудования приведён на рисунке 2.1.

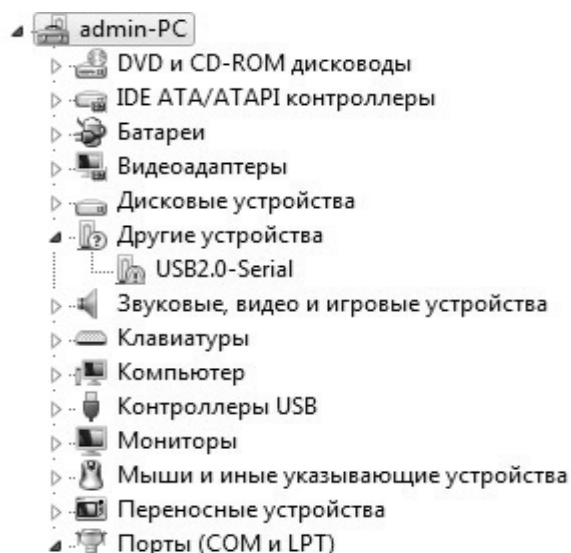


Рисунок 2.1 – Скриншот диспетчера оборудования

Необходимо скачать архив с драйвером в интернете[16]. После загрузки открыть архив с помощью программы-архиватора и извлечь папку DRIVER (Рисунок 2.2).

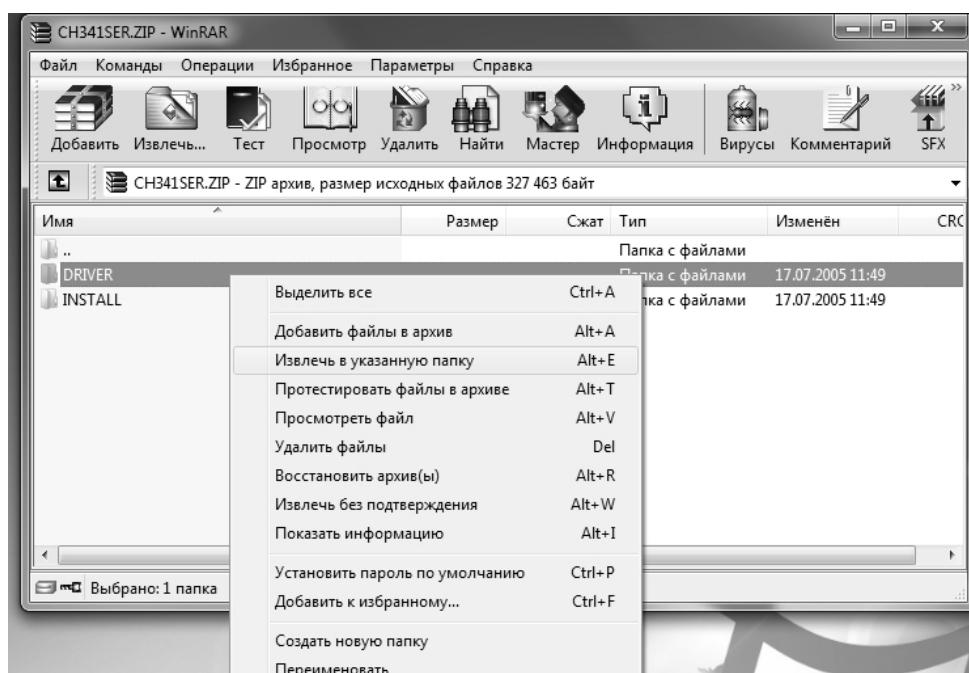


Рисунок 2.2 – Скриншот распаковки драйвера

Затем необходимо принудительно установить драйвер вручную. Зайдите в диспетчера оборудования и выполните действие, показанное на рисунке 2.3.

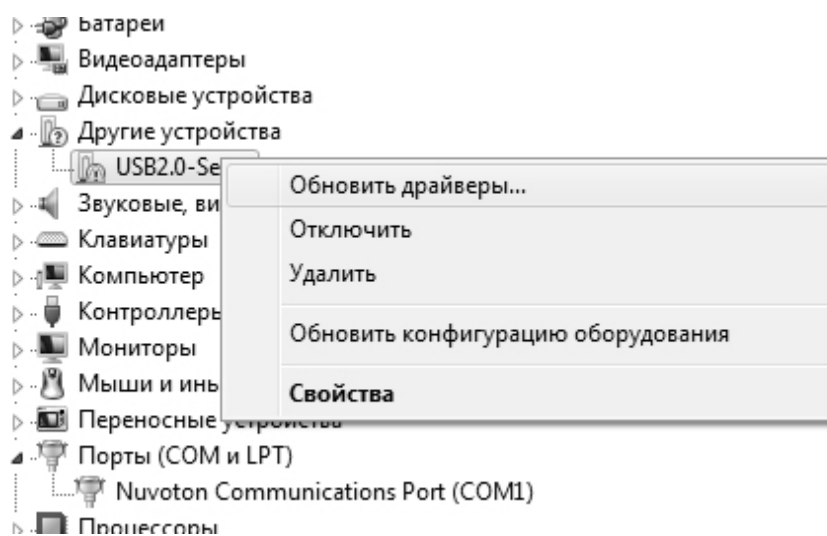


Рисунок 2.3 – Скриншот диспетчера оборудования

Выбираем пункт «Поиск и установка драйвера вручную» и указываем расположение разархивированной папки DRIVER (Рисунок 2.4).

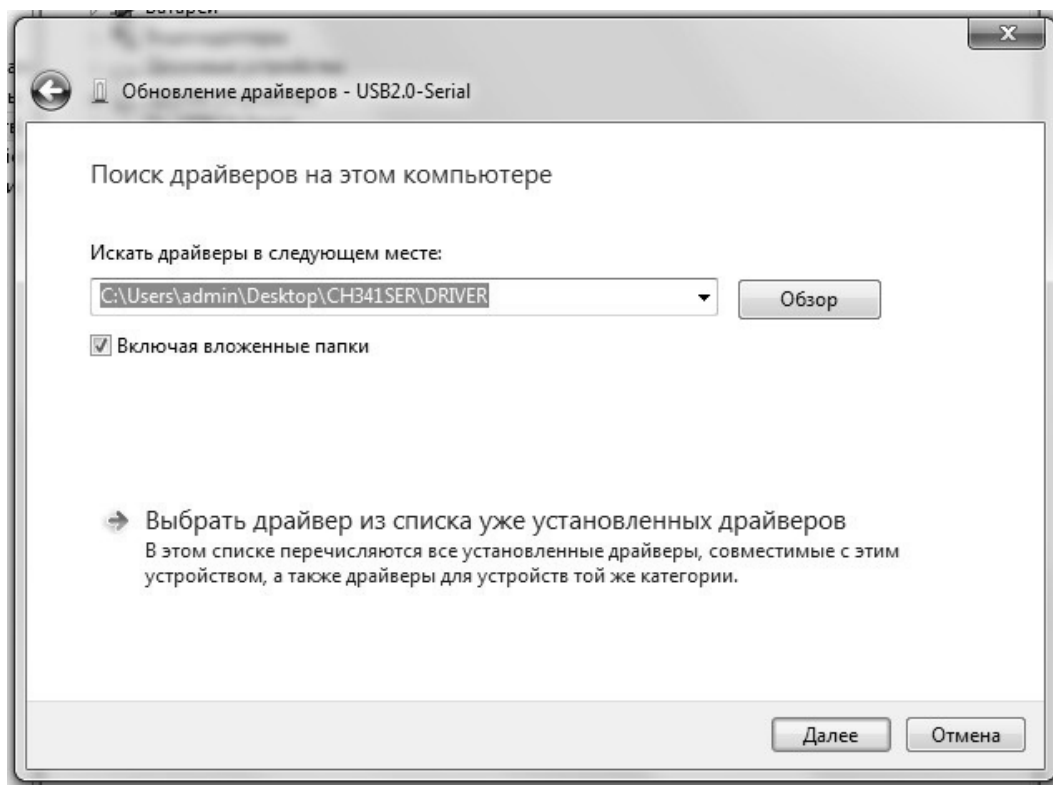


Рисунок 2.4 – Скриншот окна установки драйвера

После успешной установки ПК отобразит следующее окно (Рисунок 2.5):

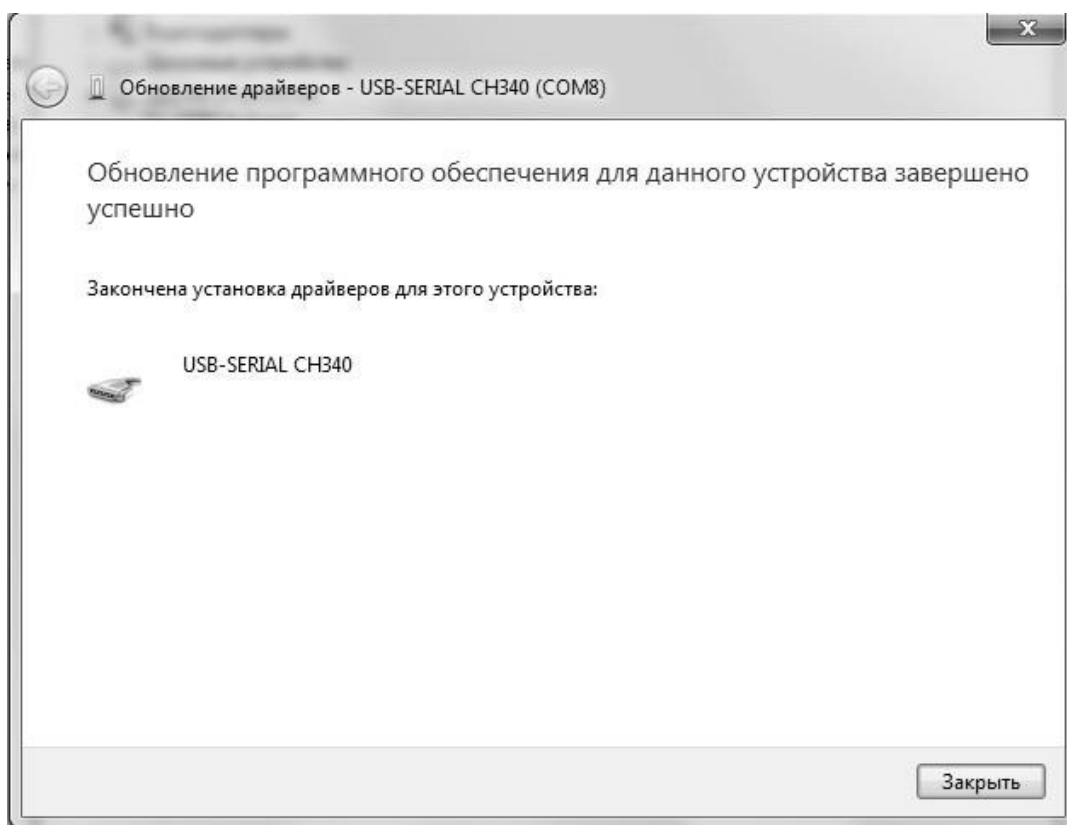


Рисунок 2.5 – Скриншот окна окончания установки драйвера

2.2 Программирование Wi-Fi модуля ESP8266

Для того, чтобы запрограммировать микроконтроллер данного устройства, нам понадобится ArduinoIDE 1.6.5, которую можно скачать на официальном сайте Arduino[5]. После установки программы, её необходимо запустить и зайти в «Файл/Настройки». В отмеченном окне необходимо прописать следующую строку: «http://arduino.esp8266.com/staging/package_esp8266com_index.json».

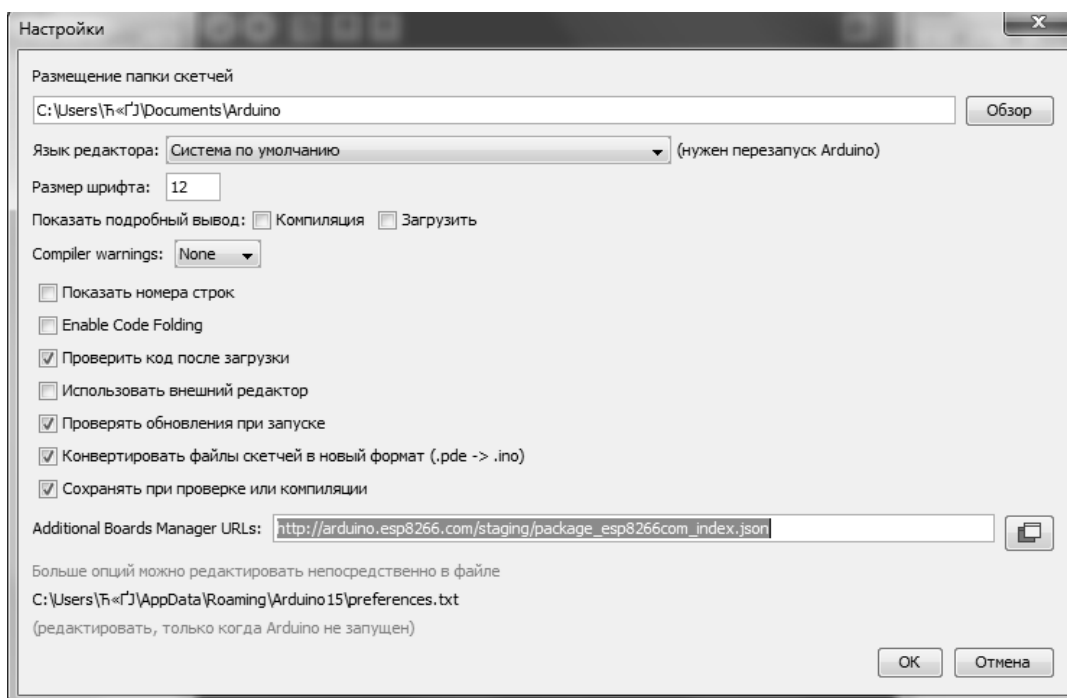


Рисунок 2.6 – Скриншот окна настроек ArduinoIDE 1.6.5

Данная строка позволит найти необходимые ресурсы для компилирования под микроконтроллер Esp8266. Для того, чтобы установить поддержку модуля, открываем вкладку «Инструменты/Выбор платы/BoardsManager». В строке поиска задаём фильтр «esp8266». Если всё сделано правильно, то остаётся только нажать «Install».

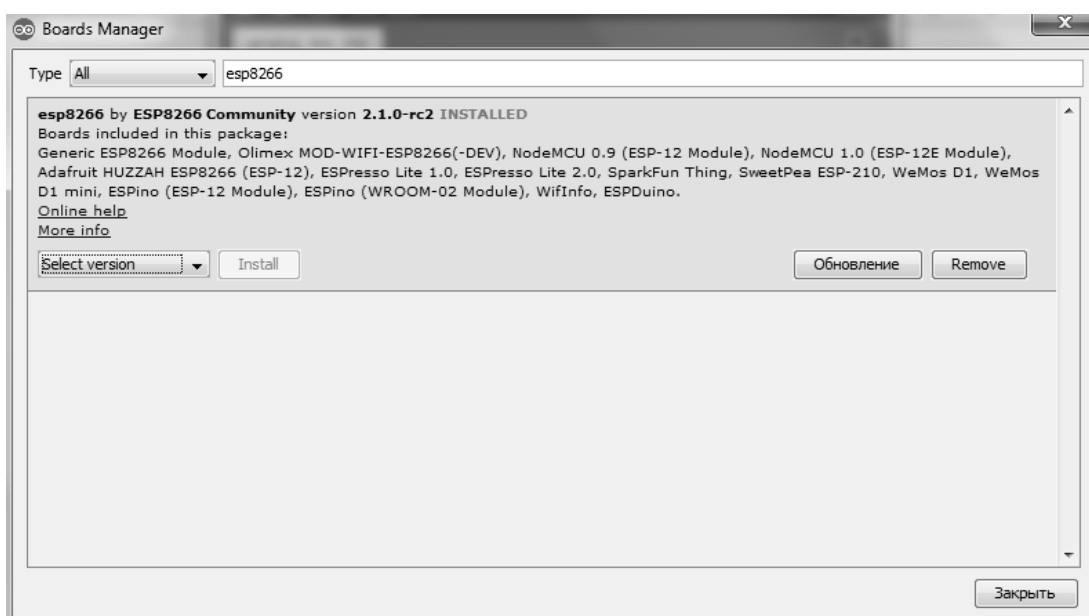


Рисунок 2.7 – Скриншот окна менеджера платформ ArduinoIDE 1.6.5

Таким образом, среда ArduinoIDE 1.6.5 подготовлена к программированию Wi-Fi модуля. Ниже приведена схема подключения для режима программирования на макетной платеbreadboard. В качестве конвертера USB-UART будем использовать тот же чип CH340G, имеющийся на плате ArduinoUNO. Предварительно необходимо либо извлечь микроконтроллер из платы, либо замкнуть пин «reset» на землю для его отключения.

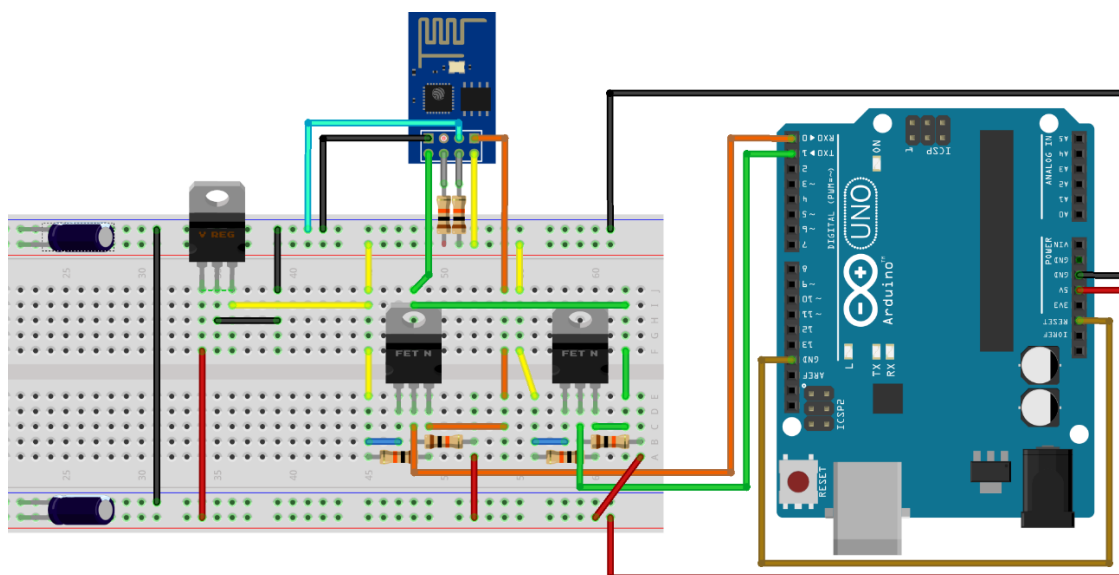


Рисунок 2.8 – Схема подключения ESP8266 в режим программирования

2.3 Разработка алгоритма управления периферийными устройствами

Полётный контроллер – это основа системы управления БПЛА. К нему предъявляются следующие критерии:

- Надёжность, безотказность системы
- Достаточная скорость обработки данных
- Автоматический контроль в случае обрыва связи с пользователем
- Возможность облегчить управление пользователю

На основе данных критерий необходимо разработать алгоритм. Однако, стоит отметить, что задача данной работы состоит лишь в разработке основы полётного контроллера, так как данные системы достаточно сложны. В условиях недостаточного количества времени невозможно разработать надёжную систему.

Алгоритм управления периферией включает в себя обмен информацией по UART-интерфейсу с Wi-Fi модулем, управление силовой частью, а также получение данных с ультразвукового датчика для автоматической посадки контроллера в случае потери связи с ручным управлением. Структурная схема показана на рисунке 2.9.

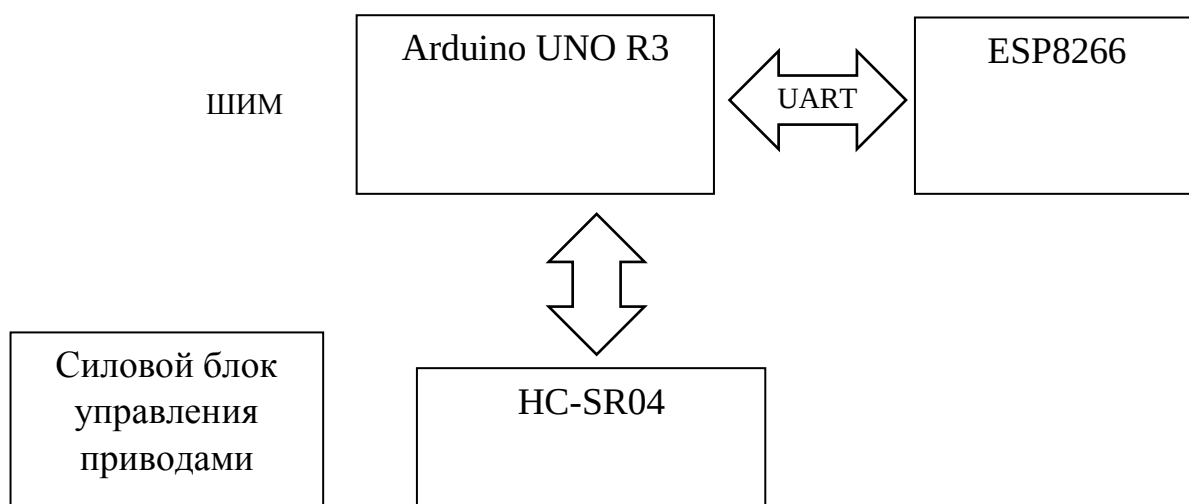


Рисунок 2.9 – Структурная схема управления периферией

На основе данной структурной схемы разработан алгоритм взаимодействия с периферийными устройствами. Его необходимо загрузить в ArduinoUNOR3. Блок-схема алгоритма, поясняющая его работу, а также листинг программы расположены в приложении 4. В листинге программы имеются настройки частоты ШИМ для портов. Частота по умолчанию для центральных приводов и хвостового привода одинакова и равна 490.20 Гц. В таблице 2.1 приведены возможные конфигурации частоты ШИМ портов.

Таблица 2.1 – Частота ШИМ у назначенных портов

Частота основных приводов (порты 9 и 10), Гц	Частота хвостового привода (порты 3 и 11), Гц
30.64	30.64
122.55	122.55
-	245.10
490.20	490.20
-	980.39
3921.16	3921.16
31372.55	31372.55

В алгоритме заложена возможность корректировки рысканья за счёт данных об угловой скорости, поступающих с гироскопа. То есть вертолёт реагирует на изменения в угловой скорости вращения вокруг горизонтальной оси без поступающих на это команд ручного управления и изменяет скорости вращения основных приводов для компенсации данного вращения. Это облегчает ручное управление пилоту. Помимо этого можно сделать полный контроль механизма, без участие гироскопа в нём.

2.4 Разработка алгоритма считывания и обработки данных

Основная задача состоит в создании алгоритма взаимодействия с информацией. Все вычислительные процессы возлагаются на модуль ESP8266, так как частота работы микроконтроллера порядка 50 МГц, что в несколько раз превышает частоту работы микроконтроллера ArduinoUNOR3. Однако, стоит отметить, что работа с Wi-Fi сетью накладывает ограничения на длительные вычисления. Они не должны превышать 200 мс. Это связано с особенностью его

работы: после каждого цикла происходит обслуживание беспроводного соединения. Если же длительность цикла превышает 200 мс, то следует задавать задержку непосредственно в цикле программы. Модуль автоматически переключается на обработку беспроводного соединения при выставленной задержке в цикле основной программы.

Краткое описание алгоритма: модуль ESP8266 подключается в качестве клиента к точке доступа Android-устройства и принимает данные с сервера. Адрес сервера: 192.168.43.1:6667. IP-адрес любого Android-устройства будет таким по умолчанию, если создать точку доступа на смартфоне. Режим шифрования точки доступа необходимо установить «WPA2/PSK». А также прописать ssid «helicAP» и пароль «thereisnospoon». При необходимости, можно поменять ssid и пароль в листинге программы. После подключения, сервер отправляет данные о командах пользователя. Принимающая сторона отправляет данные полётному контроллеру по UART-интерфейсу.

Взаимодействие с модулем ориентации в пространстве GY-88 происходит по I2C-интерфейсу. При включении питания ESP8266 производит калибровку показаний датчиков, а также настраивает в соответствующие режимы работы. В данный момент полётному контроллеру направляются только показания с гироскопа, так как автоматической системы не реализовано. Однако, в листинге программы присутствуют алгоритмы обработки показаний в полное отображение ориентации в пространстве.

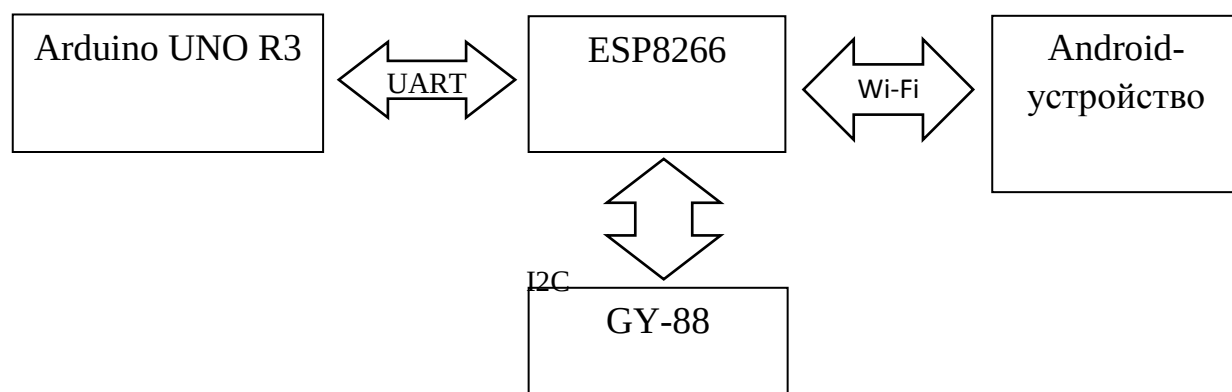


Рисунок 2.10 – Структурная схема алгоритма считывания и обработки данных

В качестве оценки ориентации в пространстве применён фильтр Маджвика. В своей статье Себастьян Маджвик полностью описал принцип построения и работы фильтра [17]. Кратко рассмотрим основные моменты:

Новый фильтр показаний датчиков для определения ориентации в пространстве в двух вариантах. Первый вариант применим к инерционным навигационным системам (ИНС), включающих акселерометр и гироскоп. Вторым вариантом применим к ИНС, включающих дополнительно 3-х осевой магнитометр (аббревиатура MARG — расшифровывается как “Magnetic, Angular Rate and Gravity”). Реализация ИНС с магнитометром подразумевает компенсацию магнитных искажений и компенсацию смещения гироскопа. В качестве инструмента используются кватернионы, которые позволяют использовать данные акселерометра и магнитометра для аналитических вычислений и оптимизации методом градиентного спуска в получении погрешности направления гироскопа в виде производного кватерниона. Преимущества включают в себя:

- Дешевизна по вычислительным ресурсам — 277 простых арифметических операций каждое обновление фильтра (109 операций без магнитометра);
- Эффективность при низких частотах дискретизации (например 10 Гц);
- Содержит 1 (без магнитометра) или 2 настраиваемых параметра, определяемых на наблюдаемых характеристиках системы.

Точность оценивалась эмпирически с использованием коммерчески доступных датчиков ориентации. Эталонные значения ориентации получены с помощью оптической системы измерения. Простой метод калибровки для использования оптического измерительного оборудования.

Точность также сопоставлена с патентованным фильтром на основе метода Калмана для датчиков ориентации. Результаты показывают, что данный фильтр достигает уровня точности, превышающий фильтр на основе метода Калмана:

- меньше 0,6 градусов среднеквадратичное отклонение в неподвижном состоянии;

- меньше 0,8 градусов среднеквадратичное отклонение в подвижном состоянии.

- Вследствие низкой вычислительной нагрузки и способности работать на низких частотах дискретизации открываются новые возможности применения ИНС для устройств реального времени с малыми вычислительными способностями и требованиями к высокой частоте выборок.

2.5 Разработка алгоритма взаимодействия с пользователем

Для взаимодействия с пользователем необходимо создать приложение для смартфона под Android. В качестве IDE использовалась программа Unity (версия 5.2.2f1)[18]. Данная программа использует язык C# для написания скриптов поведения объектов. На рисунке 2.11 показан её внешний вид. Слева располагается окно редактора для создания сцены. Вкладка «Game» отображает вид, который будет на экране. Правее располагаются вкладки «Hierarchy» и «Project». Используются для добавления в сцену новых объектов, создания скриптов и удобного структурирования проекта. В правой стороне находится вкладка «Inspector». В ней отображаются свойства объекта при его выделении.

Для создания сенсоров управления использовалась специальная библиотека. Листинги скриптов данной библиотеки представлены в приложении 6. В ходе разработки приложения возникла задача написания алгоритма обмена данными через Wi-Fi протокол. Листинг данного скрипта также представлен в приложении 6.

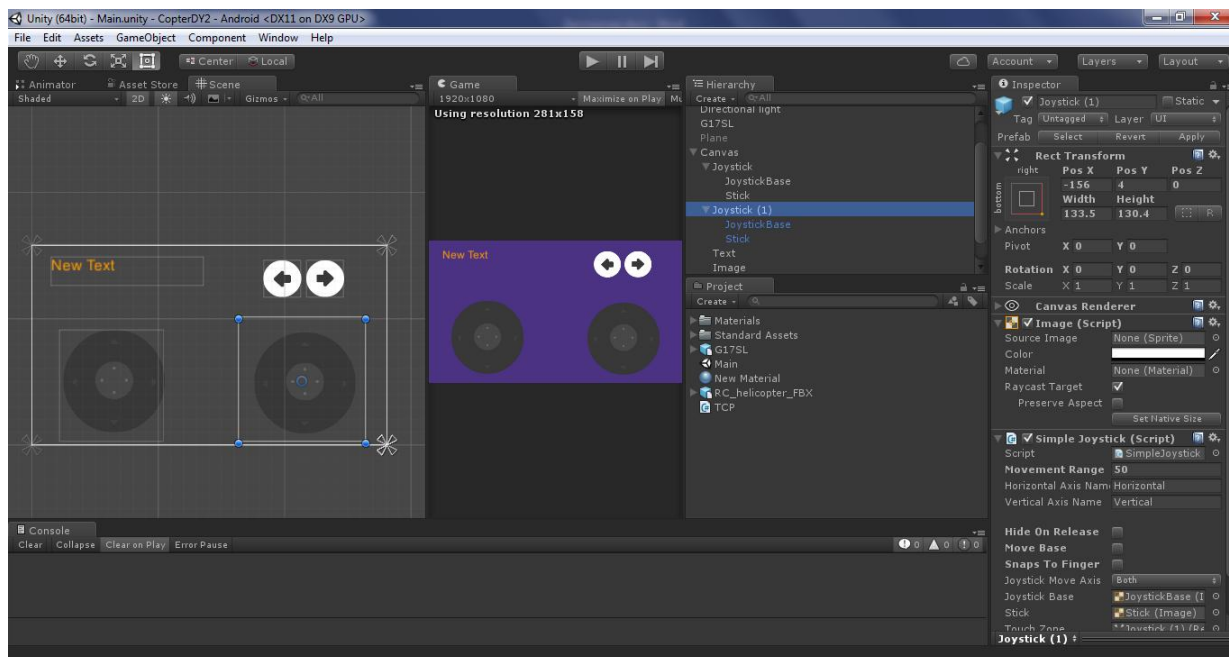


Рисунок 2.11 – Внешний вид Unity 5.2.2f1

Структурная схема взаимодействия приложения с пользователем и обмена данными с системой управления показана на рисунке 2.12.

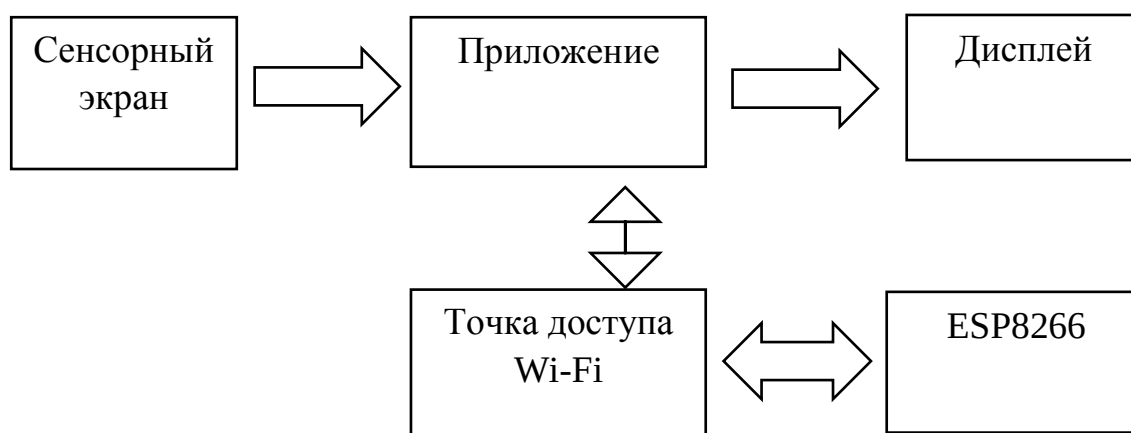


Рисунок 2.12 – Структурная схема взаимодействия с пользователем и обмена данными

3 Экспериментальный раздел

3.1 Влияние частоты ШИМ на скорость вращения приводов

В ходе данного эксперимента проводилось снятие осциллограмм напряжений основных приводов, а также напряжения и тока на двигателе верхнего винта. Для снятия формы ток использовали шунт с сопротивлением 0.3 Ом, включенный в

разрыв между питанием и нагрузкой[19]. По умолчанию ШИМ портов равен 490.20 Гц. При данной частоте мощность достаточна для отрыва от поверхности. Для сохранения приближённого сравнения, «газ» пульта управления был выставлен на 30% для каждого эксперимента. Это влияет на заполнение ШИМ сигнала. Осциллограммы напряжения и тока при частоте 490.20 Гц показаны на рисунках 3.1 и 3.2. Осциллограммы напряжения и тока при частоте 3921.16 Гц показаны на рисунках 3.3 и 3.4.

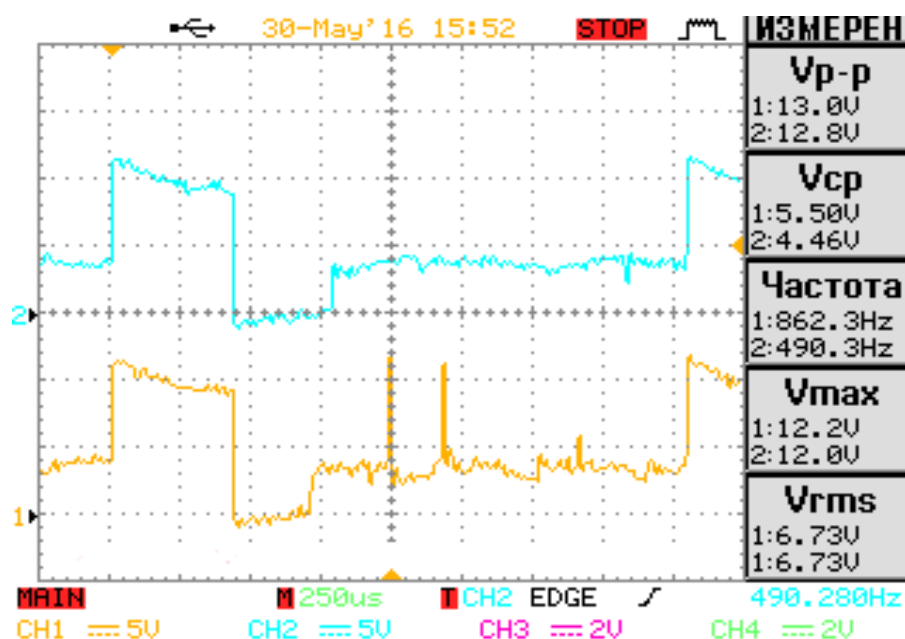


Рисунок 3.1– Осциллограмма напряжений на двигателях при частоте ШИМ 490.20 Гц

Канал 1 – напряжение на приводе верхнего винта;

Канал 2 – напряжение на приводе нижнего винта.

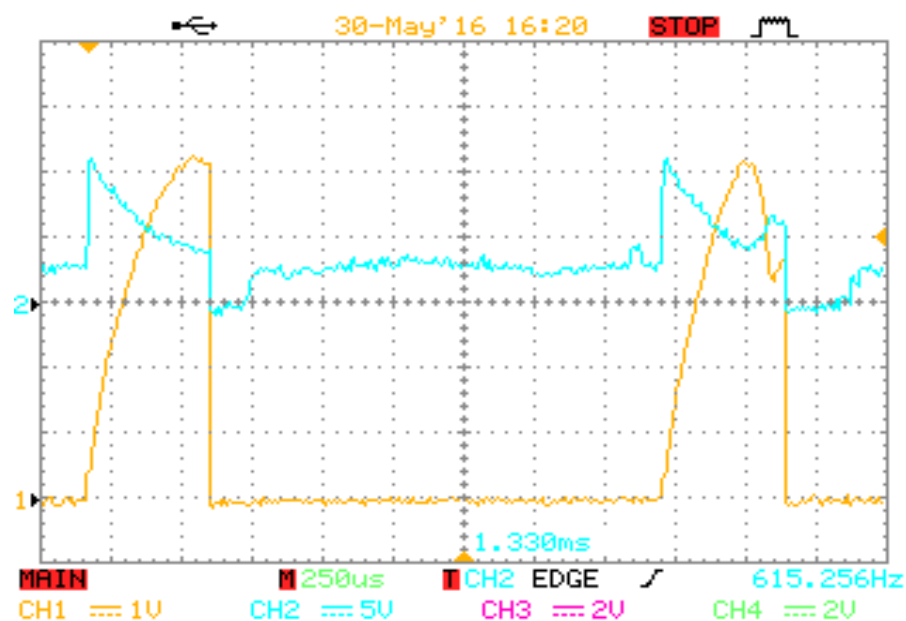


Рисунок 3.2– Осциллограмма напряжений на двигателе и шунте при частоте ШИМ 490.20 Гц

Канал 1 – напряжение на шунте 0.3 Ом;

Канал 2 – напряжение на двигателе.

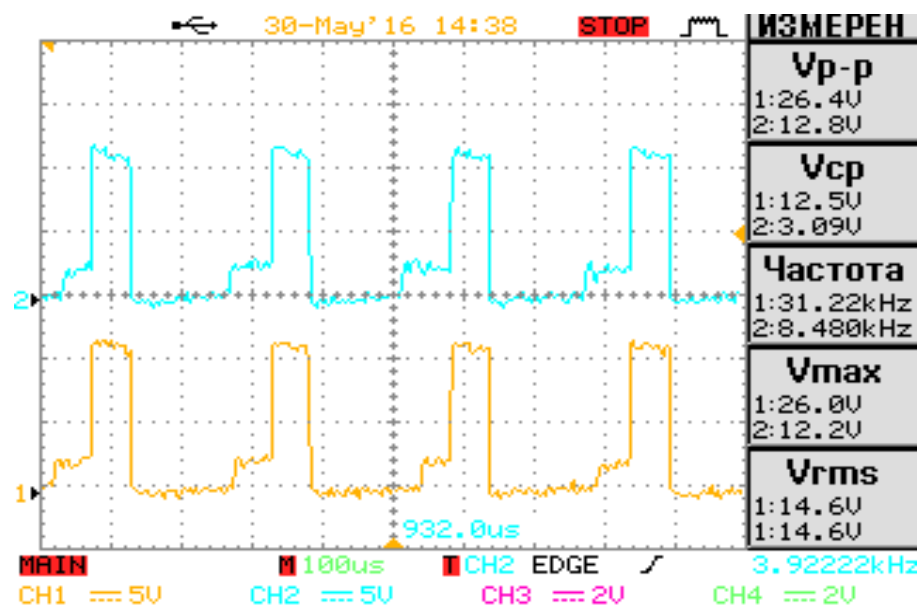


Рисунок 3.3 – Осциллограмма напряжений на двигателях при частоте ШИМ 3921.16 Гц

Канал 1 – напряжение на приводе верхнего винта;

Канал 2 – напряжение на приводе нижнего винта.

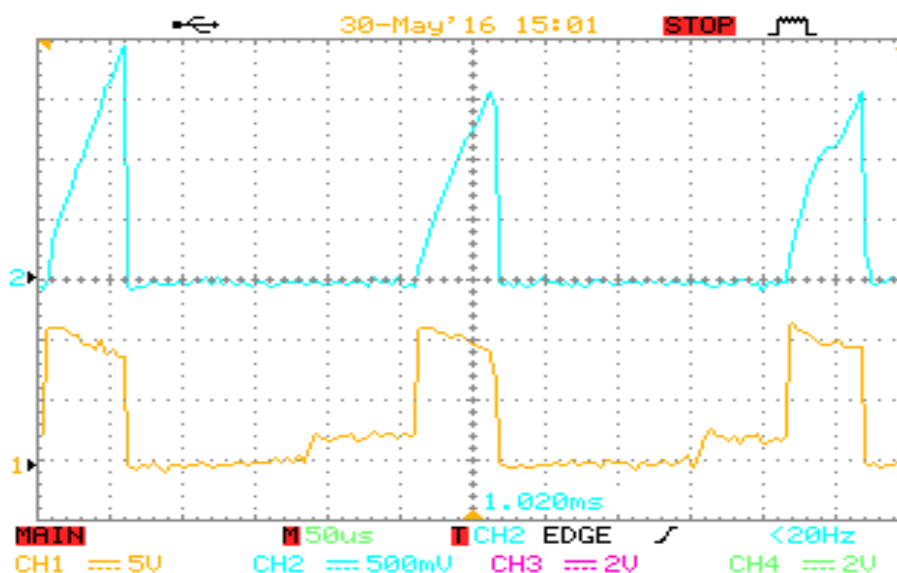


Рисунок 3.4 – Осциллограмма напряжений на двигателе и шунте при частоте ШИМ 3921.16 Гц

Канал 1 – напряжение на двигателе;

Канал 2 – напряжение на шунте 0.3 Ом.

Рассчитаем среднее значение потребляемого тока за период по осциллограммам 3.2 и 3.4:

$$I_1 = ((5.4 \text{ В} / 0.3 \text{ Ом}) * 375 \text{ мкс}) / (2 * 2025 \text{ мкс}) = 1.66 \text{ А (частота 490.20 Гц)}$$

$$I_2 = ((1.5 \text{ В} / 0.3 \text{ Ом}) * 55 \text{ мкс}) / (2 * 255 \text{ мкс}) = 0.54 \text{ А (частота 3921.16 Гц)}$$

Визуальный анализ эксперимента показал, что с увеличением частоты импульсов снижается скорость вращения лопастей, а, следовательно, подъемная сила исследуемого объекта. Это подтверждается значениями тока на осциллограммах: при увеличении частоты уменьшается значение среднего потребляемого тока. Однако старт двигателей на низких частотах происходит не плавно: из-за малого заполнения сигнала летательный аппарат начинает трясти при старте, так как потребление тока происходит скачками с достаточно большими перерывами. За это время лопасти успевают значительно снизить скорость вращения.

3.2 Дальность приёма-передачи беспроводной связи Wi-Fi модуля

Данная работа происходила на открытом воздухе в условиях, где достаточное количество людей со смартфонами, что добавляет возможность помех на частоте 2.4 ГГц. Стационарных Wi-Fi точек доступа поблизости не было. Проверка относилась к двум вариантам исполнения беспроводного приёма-передачи:

1. Точка доступа – ESP8266, клиент – смартфон с ОС Android.
2. Точка доступа – смартфон, клиент – модуль ESP8266.

Данный Wi-Fi модуль не зарекомендовал себя в использовании в качестве точки доступа беспроводной связи. Подключение к нему постоянно обрывается и пропадает. Поэтому дальнейших тестирований произвести не удалось. Поэтому эксперимент продолжился с конфигурацией под вторым номером.

Перенос точки доступа на смартфон является неудобным с точки зрения использования любого устройства на базе Android. Однако, имеет ряд положительных эффектов, таких как:

- снижение энергопотребления модуля ESP8266, что увеличивает жизненный цикл аккумулятора;
- возможность подключения нескольких устройств. Например, несколько автономных летательных аппаратов;
- простота доступа в интернет непосредственно для клиента (Сеть сотовой связи – Wi-Fi).

Дальность приёма-передачи без обрыва связи при прямой видимости составила порядка 75 м. На участке от 75 м до 100 м наблюдались потери информации. Полный обрыв связи произошёл после 100 метров. Рекомендуемая максимальная дальность при управлении летательным аппаратом – 75 метров (Рисунок 3.5).

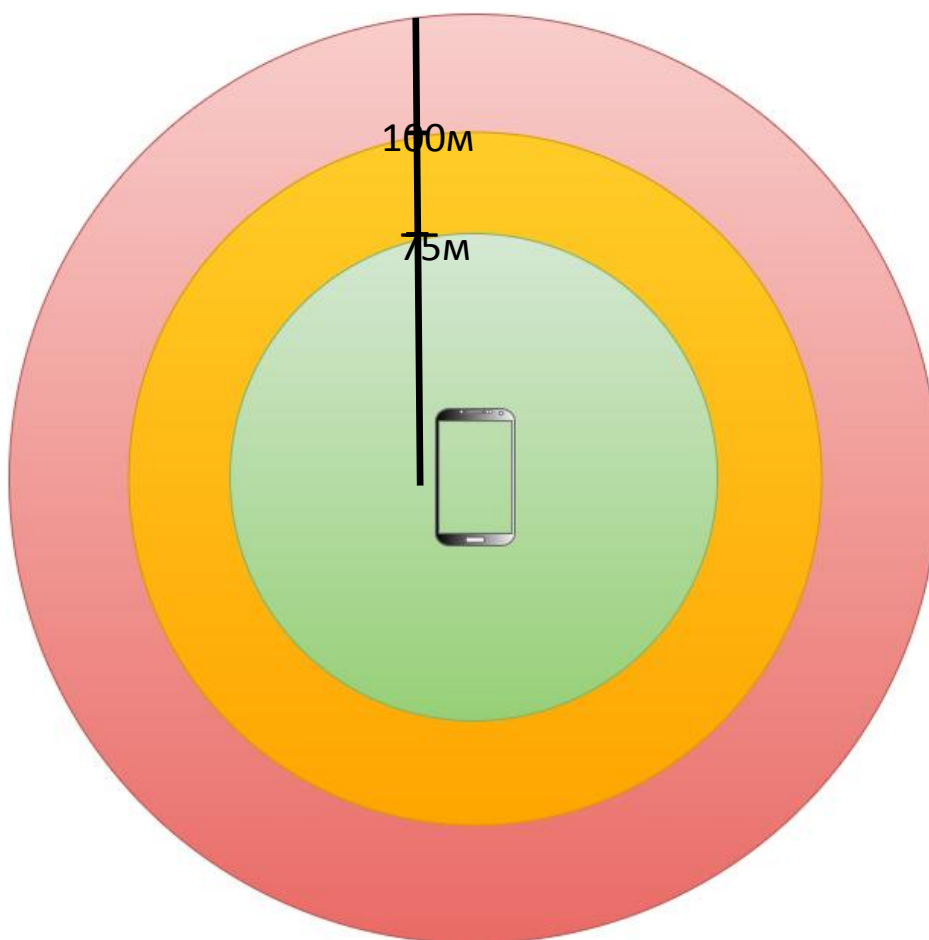


Рисунок 3.5 – Диаграмма дальности приёма-передачи

3.3 Настройка управления вертолётom

В ходе написания алгоритмов управления их необходимо было тестировать. В проведённых тестах отмечалось, что вертолёт с трудом отрывается от земли. А также не взлетает на высоту выше 0.3 м.

Проанализировав эксперименты, удалось выявить причину данного результата: данная модель рассчитана на полётный вес, равный 624 г. Для экспериментов применялся литий-полимерный аккумулятор HRB. Его основные характеристики:

- Емкость 2600 мА/ч
- Тип - 3S. Напряжение 11.1 В
- Ток разряда 30С

- Размеры 93*60*20 мм
- Вес 223 г

Добавление веса аккумулятора превысило максимально допустимый полётный вес и составило 767 г. Поэтому достигнуть стабилизированного взлёта невозможно. Для пояснения данного заключения необходимо рассмотреть механику аппарата.

Верхний винт скреплён со стабилизирующим балансиром. Балансир вносит вес и, следовательно, некоторую инерцию. Чтобы стабилизировать рысканье, обязательным условием будет разное напряжение на двигателях. В конкретном случае требуется большее напряжение на привод верхнего винта. В связи с чем можно заключить, что нижний винт работает не на полную мощность.

При подачи одинаковых управляющих сигналов на оба двигателя вертолёт взлетает, но закручивается по часовой стрелке. При попытке стабилизировать его вращение происходит его снижение.

Таким образом, необходимо сделать вес меньше максимально допустимого для полётов данной конструкции. Аккумулятор подходящего веса найти не удалось в условиях ограниченного времени и малого бюджета.

4 Конструкторско-технологический раздел

4.1 Разработка печатной платы

После испытаний образца, собранного на макетной плате, было принято решение разработать печатную плату системы управления с целью уменьшения габаритов, веса и количества соединительных проводов. А также реализовать возможность промышленного изготовления данной системы.

Разработка печатной платы проводилась в программном пакете Diptrace 2.4.0.2. Он включает в себя три модуля: «Схемотехника», «Редактор плат», «Редактор библиотек». В составе программы включена 3D визуализация[20]. Таким образом, разработчик может легко оценить вид будущей платы.

Воспользовавшись данным программным пакетом, создали принципиальную схему и печатную плату. Результаты представлены в приложении 2 и 3. А также для наглядности провели 3D моделирование, результат которого представлен на рисунках 4.1 и 4.2.

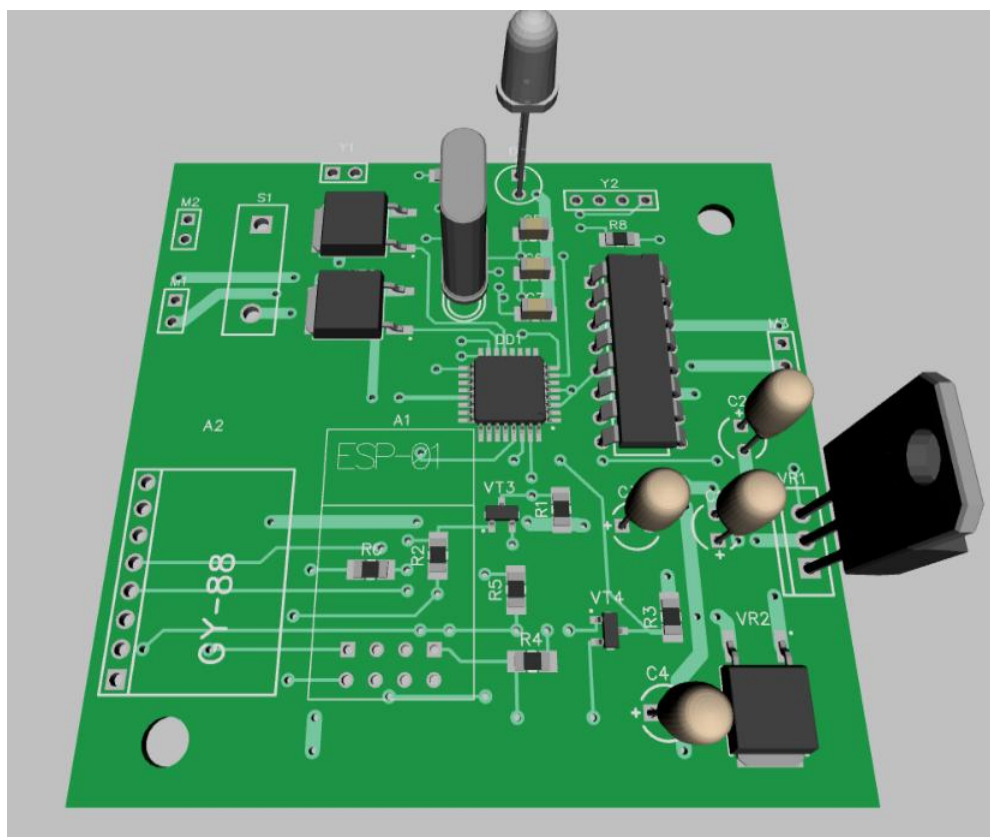


Рисунок 4.1 – 3D-модель печатной платы (верхний слой)

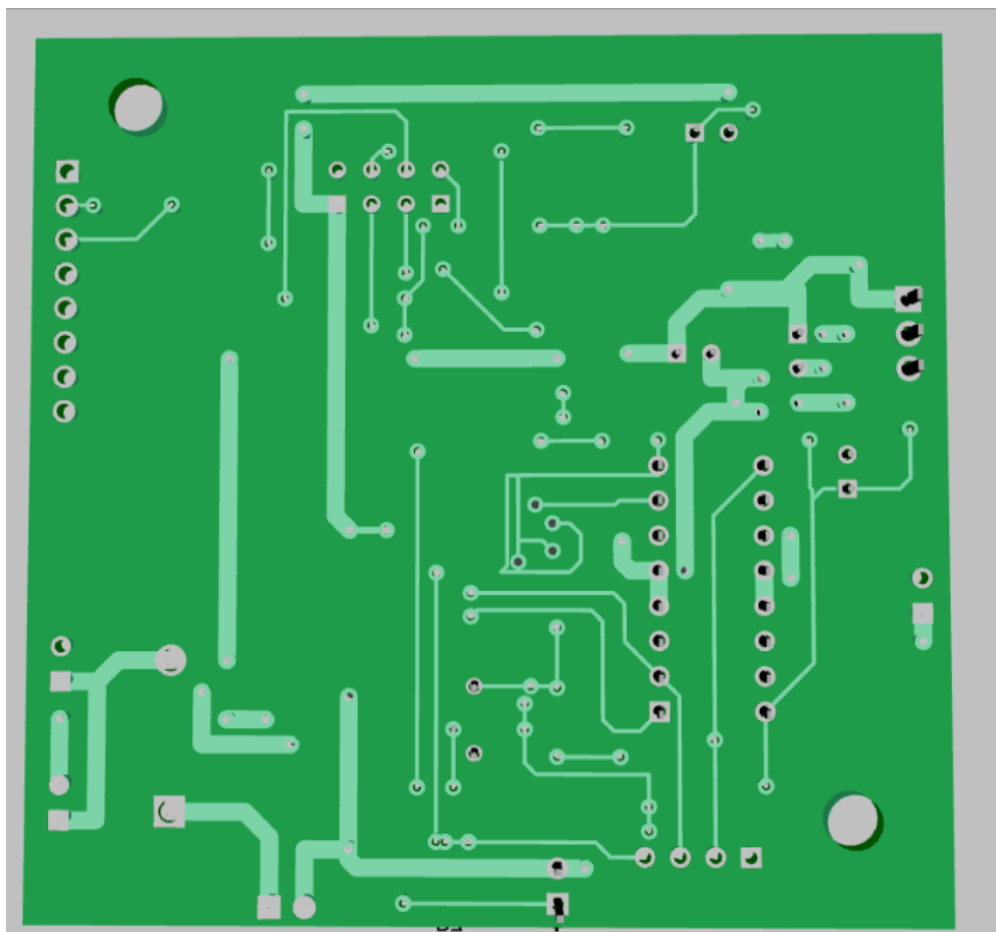


Рисунок 4.2 – 3D-модель печатной платы (нижний слой)

Для того, чтобы запрограммировать микроконтроллер ATmega328p, на печатной плате выведены порты SCK, MISO, MOSI и RST. Прошивку можно внедрить в контроллер через ArduinoIDE с помощью любой платы Arduino, либо с помощью программатора AVR, имеющего разъем ICSP.

5 Экономический раздел

Уменьшение финансовых затрат разработанного устройства заключается в применении распространённых компонентов малой стоимости. А также, применение Wi-Fi в качестве канала передачи информации и разработка приложения на смартфон с ОС Android позволило убрать специализированный пульт ручного управления. Стоимость опытного образца превышает стоимость разработанного устройства на печатной плате. Это связано с тем, что при изготовлении опытного образца большинство компонентов приобреталось в

розничных магазинах электроники. В таблице 5.1 представлены цены компонентов на опытный образец.

Таблица 5.1- Стоимость компонентов на опытный образец

Название	Количество, шт.	Цена, руб./шт.	Стоимость, руб
Резистор 10 кОм 0.25 Вт	6	2	12
Переключатель DC	1	20	20
Стабилизатор напряжения 5 В KP142EH5A	1	20	20
Стабилизатор напряжения 3.3 В LM1117-3.3	1	78	78
Конденсатор электролитический 16 В 10 мкФ	4	2	8
Транзистор IRLR3103 30 В 52 А	2	30	60
Транзистор BSS123 100 В 0.17 А	2	5	10
Микросхема L293D	1	100	100
Плата Arduino UNO R3	1	170	170
Модуль ESP8266	1	120	120
Модуль GY88	1	673	673
Макетная плата	1	13	13
Итого:	1284 руб.		

С целью повышения экономической эффективности работы, нами был проанализирована торговая интернет-площадка Aliexpress. В таблице 5.2 представлены цены на спроектированное устройство при условии массового производства.

Таблица 5.2- Стоимость компонентов на Aliexpress

Название	Количество, шт.	Цена, руб./шт.	Стоимость, руб
Чип-резистор 103	7	0.47	3.29
Чип резистор 221	1	0.47	0.47
Светодиод зеленый	1	1.69	1.69
Переключатель DC	1	10	10
Стабилизатор напряжения KP142EH5A	1	5.67	5.67
стабилизатор напряжения LM1117-3.3	1	37.34	37.34
Конденсатор электролитический 16 В 10 мкФ	4	1.47	5.88
Чип-конденсатор 22 пФ	3	0.37	1.10
Транзистор IRLR3103 30 В 52 А	2	13.85	27.70
Транзистор BSS123 100 В 0.17 А	2	1.48	2.96
Кварцевый резонатор 12 МГц	1	4.40	4.40
Микросхема L293D	1	23.80	23.80
Микроконтроллер ATMEGA328P-AU	1	79.47	79.47
Модуль ESP8266	1	120	120
Модуль GY88	1	673	673
Печатная плата стеклотекстолит двусторонняя	1	70	70
Итого:	1066.77 руб.		

Конечное устройство можно сравнить по стоимости с тем, что стояло изначально в вертолётё SymaS033G. В таблице 5.3 отображена итоговая стоимость разработанной системы управления и заводской системы. Цена заводской системы взята с торговой интернет-площадки Aliexpress.

Таблица 5.3- Сравнение стоимости разработанного и заводского устройства

Критерий сравнения	Разработанное устройство	Заводское устройство
Состав	Плата управления; Приложение на смартфон	Плата управления; Пульт управления
Стоимость отдельных элементов	Плата управления (рисунок 5.1)-1066.77 руб.	Плата управления (рисунок 5.2)- 1076.85 руб.
	Приложение на смартфон (рисунок 5.3)- 0 руб.	Пульт управления (рисунок 5.4)- 1211.53 руб.
Итоговая стоимость	1067.77 руб.	2288.40 руб.

Таким образом, стоимость разработанной платы управления не превышает стоимость заводской платы. А также перенос управления на смартфон уменьшает затраты.

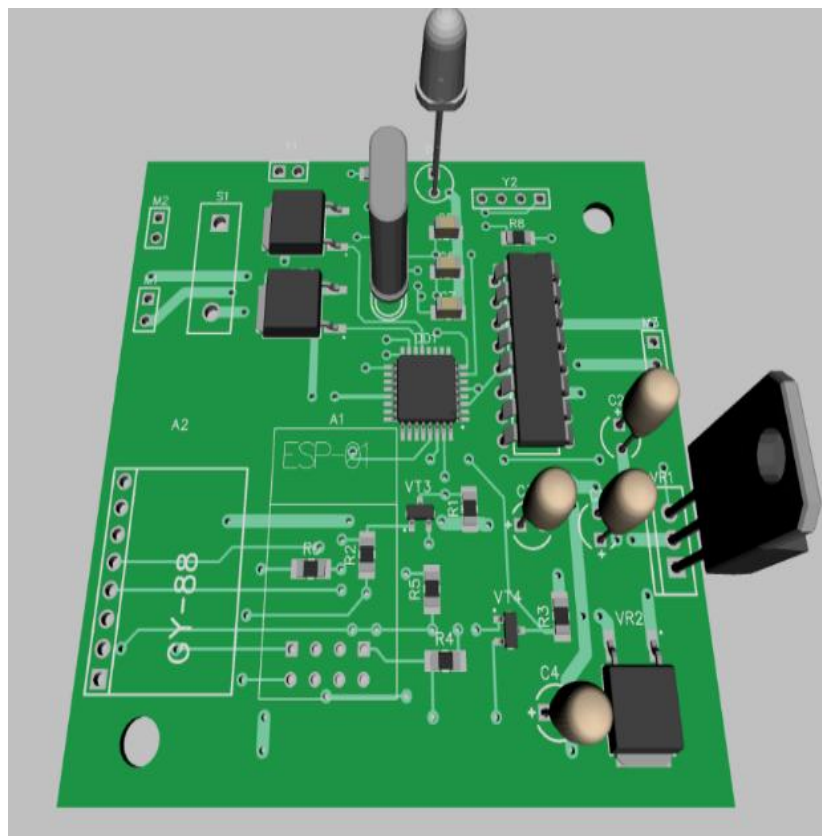


Рисунок 5.1-Плата управления разработанного устройства

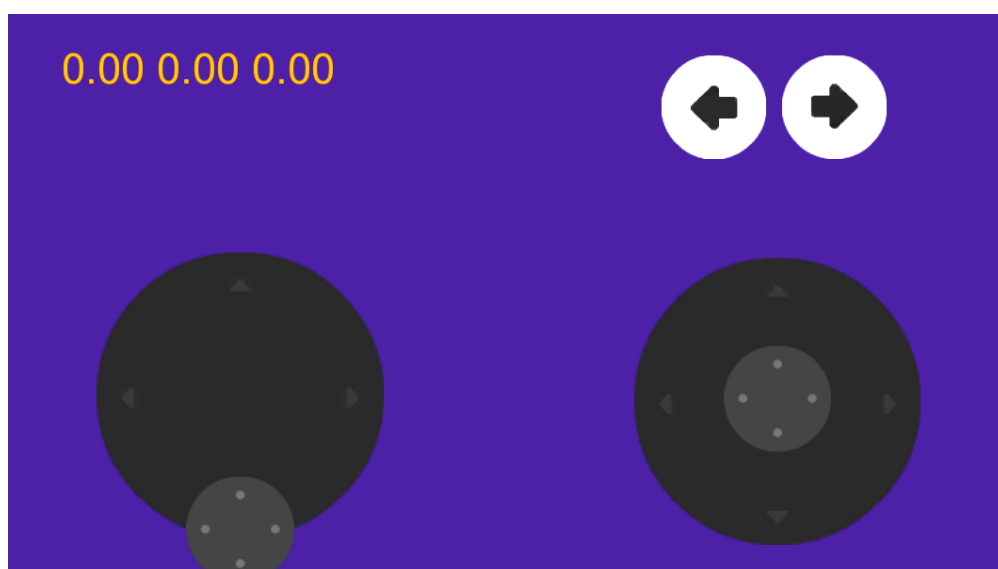


Рисунок 5.2- Скриншот приложения на смартфон

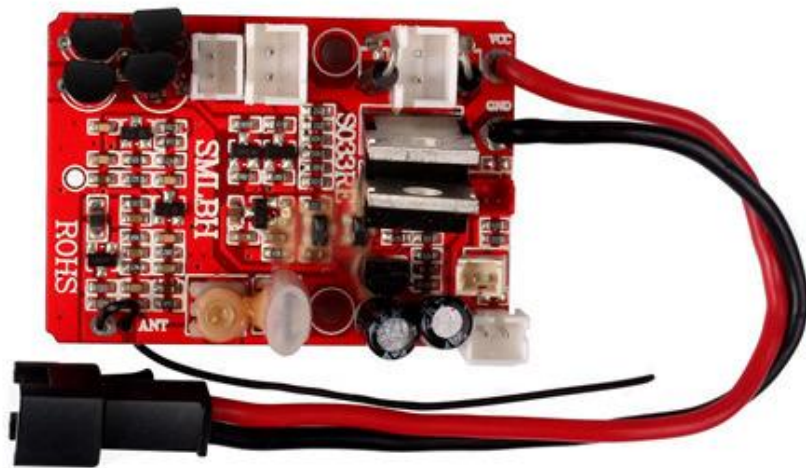


Рисунок 5.3- Плата управления заводского устройства



Рисунок 5.4- Пульт управления заводского устройств

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы были решены задачи, необходимые для достижения поставленной цели. Цель работы заключалась в создании системы управления беспилотным летательным аппаратом вертолётного типа, демонстрирующей уровень подготовки выпускников кафедры «Промышленная электроника», Тольяттинского государственного университета.

В результате выполнения разработан опытный образец системы управления вертолётom SymaS033 и спроектирована печатная плата, для возможности использования данной системы с простотой и удобством, а также написано приложение на смартфон с операционной системой Android для ручного пользовательского управления. Кроме того, в систему управления добавлена возможность построения автономного аппарата на базе современного недорогого модуля ориентации в пространстве.

При тестировании объекта исследования была выявлена особенность данной конструкции. Она заключается в достаточно малом максимальном полётном весе. В связи с этим в конечной модели не удалось добиться стабильного полёта из-за отсутствия аккумулятора, отвечающего требованиям. Кроме того, в ходе настройки системы управления была исследована зависимость частоты ШИМ управляющего сигнала на тяговую мощность приводов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пермин, В.Ю. Беспилотники: воздушные роботы мирного назначения [электронный ресурс], URL: http://www.equipnet.ru/articles/hi-tech/hi-tech_1478.html (дата обращения 4.03.16)
2. Официальный сайт представитель Syma, [Электронный ресурс], содержит данные о вертолётё SymaS033. URL: <http://www.symatoys.com/> (дата обращения 10.03.16)
3. Официальный сайт представитель 1bitsquared, [Электронный ресурс], содержит данные о контроллере Lisa/MX. URL: <http://1bitsquared.com/> (дата обращения 16.03.16)
4. Официальный сайт представитель Ardupilot, [Электронный ресурс], содержит данные о контроллере Ardupilot. URL: <http://ardupilot.com/> (дата обращения 22.03.16)
5. Приказ № 124 от 14.09.2010 "Об утверждении Правил применения оборудования радиодоступа. Часть I. Правила применения оборудования радиодоступа для беспроводной передачи данных в диапазоне от 30 МГц до 66 ГГц", [Электронный ресурс], URL: <http://www.minsvyaz.ru/ru/documents/3417/> (дата обращения 27.03.16)
6. Официальный сайт представитель Arduino, [Электронный ресурс], содержит данные о контроллере Arduino UNO R3. URL: <https://www.arduino.cc/>, (дата обращения 29.03.16)
7. Datasheet of CH340 Olimex, [Электронный ресурс], URL: <https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-CH340T/resources/CH340DS1.PDF> (дата обращения 10.04.16)
8. Сообщество разработчиков с ESP8266, [Электронный ресурс], содержит данные о модуле ESP8266. URL: <http://esp8266.ru/> (дата обращения 10.04.16)

9. ESPRESSIF SMART CONNECTIVITY PLATFORM: ESP8266, [Электронный ресурс], URL: https://www.adafruit.com/datasheets/ESP8266_Specifications_English.pdf (дата обращения 14.04.16)
10. Евстифеев, А.В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL / А.В. Евстифеев – 5-е изд., стер. — М.: Издательский дом «Додэка_XXI», 2015. — 560 с.
11. MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.0, [Электронный ресурс], URL: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=56ce2ac6b0366d576c6922ca&assetKey=AS%3A332778320220160%401456351942347> (дата обращения 18.04.16)
12. 3-Axis Digital Compass ICHMC5883L, [Электронный ресурс], URL: https://www.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf (дата обращения 24.04.16)
13. BMP085 Digital pressure sensor Datasheet, [Электронный ресурс], URL: https://www.adafruit.com/datasheets/BMP085_DataSheet_Rev.1.0_01July2008.pdf (дата обращения 4.05.16)
14. Окснер, Э.С. Мощные полевые транзисторы и их применение / Э.С. Окснер — М: Радио и связь, 1985 г.
15. L293x Quadruple Half-H Drivers, [Электронный ресурс], URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf> (дата обращения 8.05.16)
16. KP142EH5A стабилизатор напряжения положительной полярности, [Электронный ресурс], содержит документацию на KP142EH5A. URL: <http://www.transistor.by/i/pdf/kr142en5a.pdf> (дата обращения 8.05.16)
17. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, [Электронный ресурс], URL: www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf (дата обращения 12.05.16)
18. Левин, А.А. Установка драйвера CH340G [Электронный ресурс], <http://arduino-project.net/driver-ch340g/> (дата обращения 14.05.16)

- 19.Баранов, Е.К. Работа с осциллографом [Электронный ресурс],
<http://www.electroclub.info/article/oscillograf.htm> (дата обращения 17.05.16)
- 20.Кравцов, Н.А. Создание 3D-моделей в DipTrace [Электронный ресурс],
<http://we.easyelectronics.ru/CADSoft/sozdaem-3d-detalki-dlya-diptrace.html>(дата обращения 21.05.16)