



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ «Специальное машиностроение»

КАФЕДРА «Робототехнические системы и мехатроника»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ
НА ТЕМУ:

***Разработка двухосевого привода направленной
антенны для установки на БПЛА***

Студент СМ7-72Б
(Группа)

(Подпись, дата)

Санников А.К.
(И.О.Фамилия)

Руководитель

(Подпись, дата)

Гуляев И.А.
(И.О.Фамилия)

Консультант

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

2024 г.

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой _____
(Индекс)

(И.О.Фамилия)
« ____ » _____ 20 ____ г.

**З А Д А Н И Е
на выполнение курсового проекта**

По теме: _____ Разработка двухосевого привода направленной антенны
для установки на БПЛА

Студент группы _____ СМ7-726

_____ Санников Артём Константинович
(Фамилия, имя, отчество)

Направленность КП (учебная, исследовательская, практическая, производственная, др.)
_____ практическая

Источник тематики (кафедра, предприятие, НИР) _____ НИР

График выполнения КП: 25% к 5 нед., 50% к 7 нед., 75% к 10 нед., 100% к 14 нед.

Техническое задание _____ Разработать блок управления двухосевого привода для
встраивания в систему ретрансляции сигнала с возможностью установки на БПЛА
для увеличения дальности передачи сигнала

Оформление курсового проекта:

Расчетно-пояснительная записка на _____ листах формата А4.

Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т.п.)

Дата выдачи задания « 17 » сентября 2024 г.

Руководитель КП

(Подпись, дата)

Гуляев И.А.
(И.О.Фамилия)

Студент

(Подпись, дата)

Санников А.К.
(И.О.Фамилия)

Примечание: Задание оформляется в двух экземплярах: один выдается студенту, второй хранится на кафедре.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ.....	5
3 СОЗДАНИЕ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ	9
3.1 Расчет силового каскада	11
3.2 Гальваническая развязка	13
4 ВЫБОР МИКРОКОНТРОЛЛЕРА И ЕГО ПОДКЛЮЧЕНИЕ	16
5 ПОДКЛЮЧЕНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ И СХЕМА ПИТАНИЯ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ.....	20
6 ВЫБОР КОММУТАТОРОВ ВНЕШНИХ КОМПОНЕНТОВ С ПЛАТОЙ.....	21
7 РАЗРАБОТКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ.....	23
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	24
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	25

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с системами FPV (First-Person View) становятся всё более популярными. Эти технологии находят широкое применение в различных областях, включая исследования, разведку и даже боевые действия. Одним из важнейших аспектов, который определяет эффективность использования БПЛА, является дальность передачи сигнала. Однако с увеличением дальности работы возникает проблема обеспечения стабильности и скорости передачи данных, что критично для успешного функционирования таких аппаратов в различных условиях.

Для решения этой задачи разрабатывается привод направленной антенны ретранслятора для установки на вспомогательный БПЛА. Это позволяет значительно увеличить дальность действия системы без потери качества передачи данных. В данном контексте создание эффективных систем управления для таких комплексов становится ключевым элементом для успешного функционирования всей системы в целом.

В рамках настоящей курсовой работы, опираясь на курсовую работу по теории автоматического управления (ТАУ), будет разработан блок управления для двух BLDC двигателей, предназначенный для управления подвесом ретранслятора на вспомогательном БПЛА. Этот блок управления обеспечит точную настройку и стабилизацию работы системы, что в свою очередь повысит эффективность работы всей системы ретрансляции и передачи данных на больших расстояниях.

1 Техническое задание

Необходимо разработать плату для управления двумя двигателями привода, с входным интерфейсом для приема управляющих воздействий, которые будут приходить в формате 2х требуемых углов поворота.

В ходе научно-исследовательской работы было определены требуемые характеристики привода:

Таблица 1. Техническое задание на разработку привода

Параметр	Значение	Ед. измерения
Общая масса	2700	г.
Предельные габариты	300x300x300	мм
Напряжение питания	12	В
Диапазон вращения оси 1	$0 \leq \varphi \leq 360$	°
Диапазон вращения оси 2	$-180 \leq \gamma \leq 0$	°
Угловая скорость вращения осей	87,26	рад/с
Угловое ускорение вращения осей	872,66	рад/с ²
Время переброски на 360° (время переходного процесса)	0.125	сек
Ошибка слежения	1	°
Перерегулирование при переброске	10	%

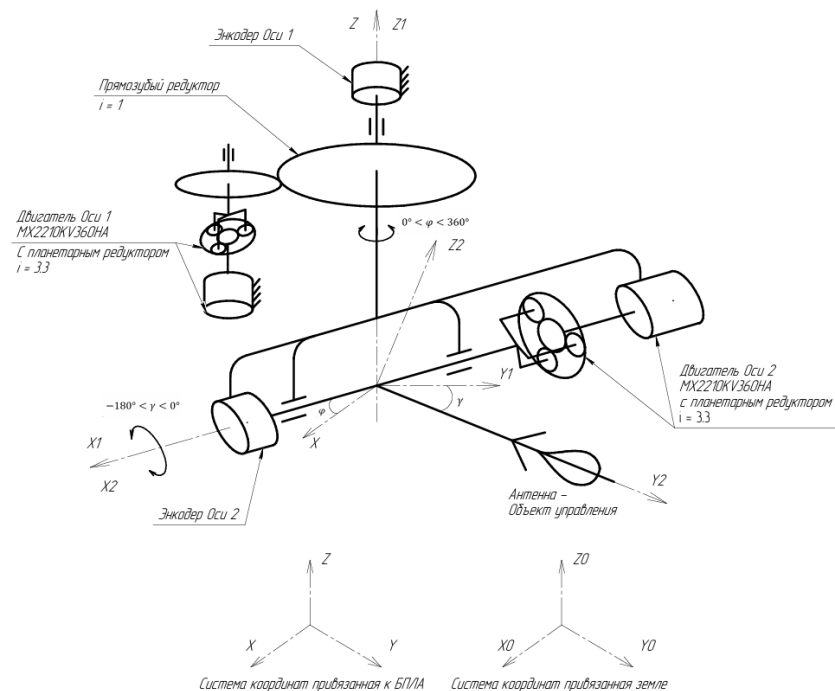


Рис. 1 Кинематическая схема привода

Здесь стоит отметить что в ходе курсовой работы по ТАУ было принято решение использовать BLDC двигатели MX2210KV360HA с датчиками холла для каждой оси:



Рис. 2 BLDC двигатели MX2210KV360HA

Также были определены используемые энкодеры обратной связи на 4096 импульсов на оборот, представлен на рисунке 3:



Рис. 3 Энкодер ACCNT

Таблица 2. Параметры импульсного датчика положения

Количество импульсов на оборот	4096
Напряжение питания, В	5
Потребляемый ток, мА	12
Количество сигнальных выходов	4

Согласно которой можно определить что управляющий сигнал поступает на плату через интерфейс UART, что также важно при разработке блока управления. Дополнительно нужно реализовать интерфейс для программирования МК, и дополнительные отладочные выводы, которые будут определены в ходе разработки.

Питание платы будет осуществляться от бортового аккумулятора БПЛА, согласно документации выбранного квадрокоптера DJI MATRICE 300, составлена таблица параметров источника питания:

Таблица 3. Параметры источника питания блока управления

Емкость аккумулятора, mAh	5935
Напряжение питания, В	12
Максимальный ток, А	360

2. Функциональная схема блока управления

Опираясь на функциональную схему разработанную в ходе научно исследовательской работы составим функциональную схему разрабатываемого блока управления, источник питания не учтен на схеме:

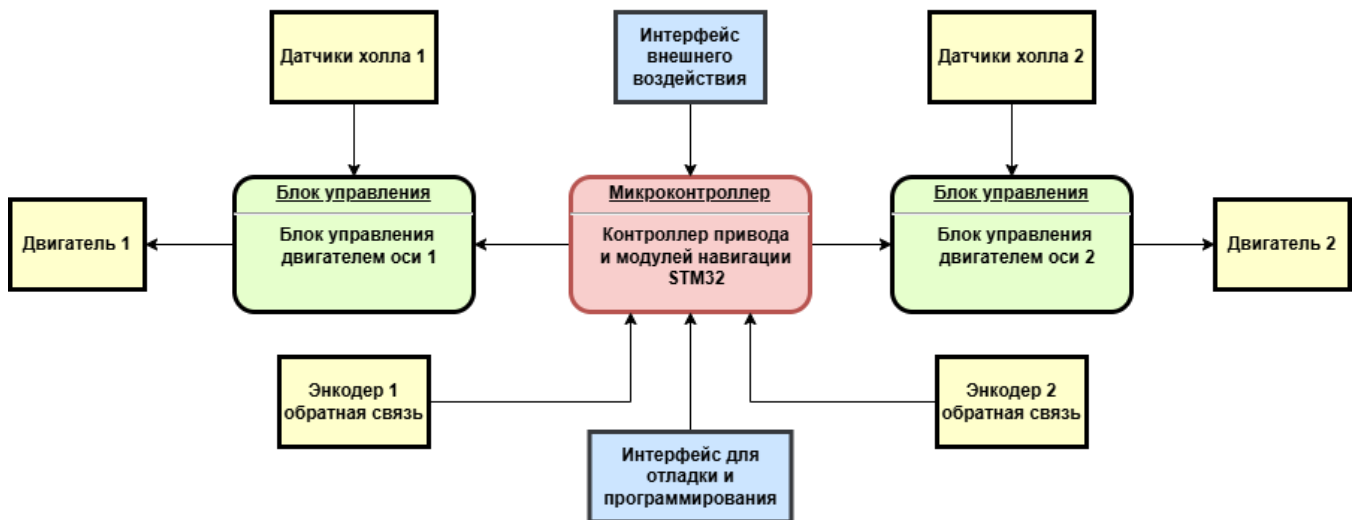


Рис. 4 Функциональная схема блока управления

Как видно из схемы система получается симметричная поэтому дальнейшие расчеты и рассуждения будем проводить лишь для одного из двигателей, второй будет получен методом копирования.

3 Создание блока управления двигателем

Для управления BLDC двигателем необходимо реализовать часть схемы – блок управления двигателем (усилитель мощности). Управлять таким двигателем можно реализовав векторное управление: обрабатывать сигналы с датчиков холла, генерировать управляющий трехфазный ШИМ-сигнал. Однако с программной точки зрения это непростая задача, поэтому было принято решение использовать готовые драйверы, которые уже самостоятельно решают задачу управления скоростью(см. рис 6), и на вход принимают уже только один ШИМ-сигнал и несколько логических сигналов. Примером такого модуля является – микросхема JY01(рис. 5) его мы и будем использовать в качестве основы блока управления.

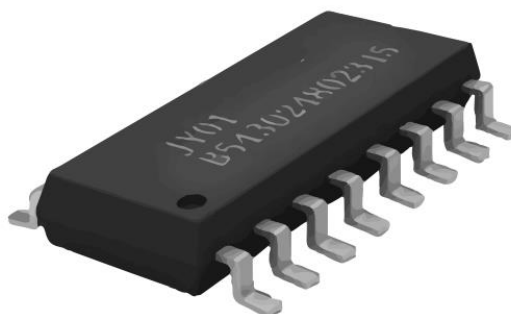


Рис. 5 Контроллер JY01

FORWARD DRIVE OUTPUT OSCILLOGRAM

(SPWM output close to sinusoid, well electromagnetic noise restraint)

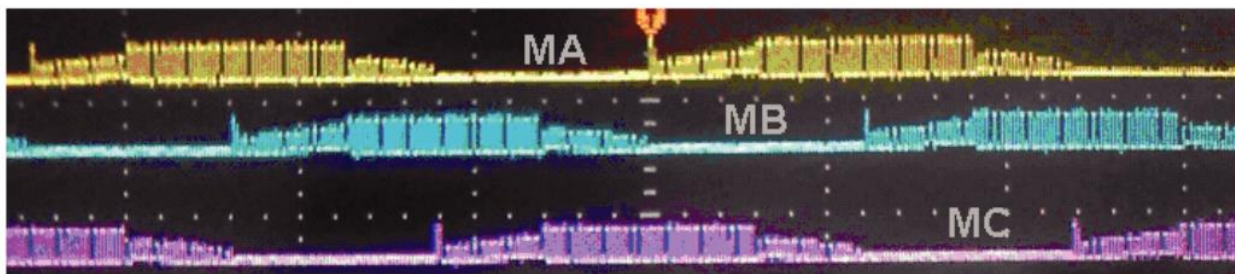


Рис. 6 Осциллограмма управляющих сигналов

В документации к микросхеме[6] приведены несколько схем подключения, различных ситуаций, например схема с обратной связью по току, или по

скорости. Выбираем схему с датчиками холла так как в выбранный двигатель они встроены и мы можем их использовать. Схема Подключения представлена на рис. 7.

2. JY01 apply to Hall sensor brushless DC motor schematic

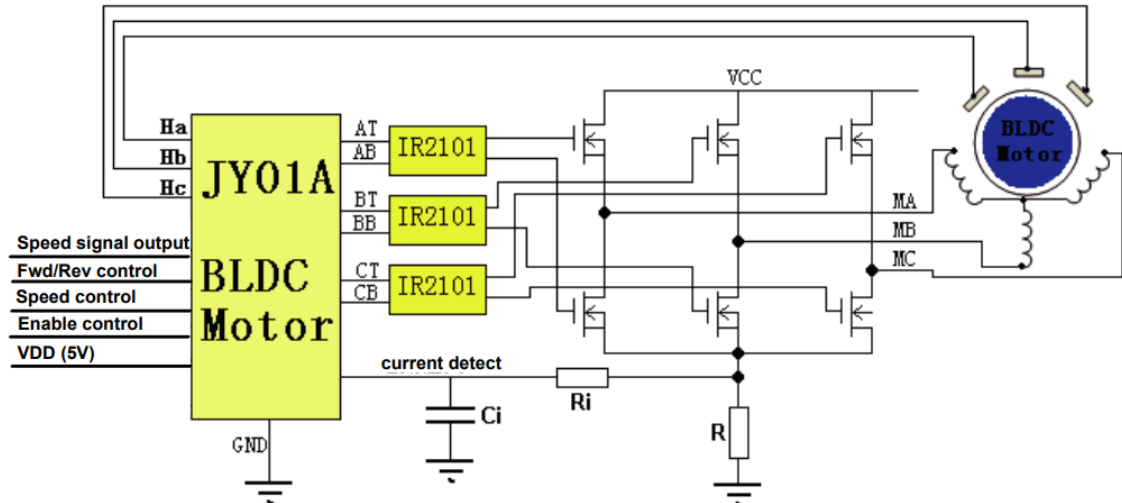


Рис. 7 Схема подключения с датчиками Холла

Помимо самого драйвера в систему также входят драйверы ключей IR2101. Выбираем вариант в корпусе SOIC8, так как он подходит по мощности и занимает меньше места чем DIP исполнение. Типовая схема подключения представлена на рисунке 8.

Typical Connection

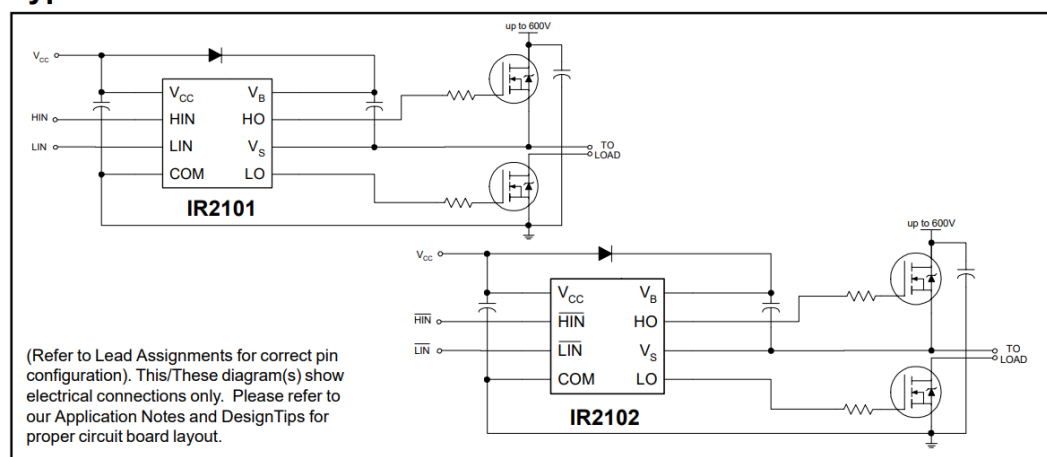


Рис. 8 Схема подключения IR2101

В схеме имеются диод и конденсаторы, выберем диод IN4148WS и керамические конденсаторы номиналом 105 пФ в корпусе 0603 в соответствии с рекомендациями производителя микросхемы JY01.

3.1 Расчет силового каскада

В документации JY01 приведена общая структура и конкретные транзисторы для силового каскада необходимо подбирать для каждого конкретного двигателя. Решим задачу подбора транзисторов.

Выбор транзисторного ключа осуществляется по напряжению, протекаемому в цепи стока (коллектора) току, выделяемой мощности и частотным характеристикам. Для начала, получим исходные данные для расчета:

$$U_{\text{си.макс}} = 1.1U_{\text{дв}} = 1.1 * 12 = 13.2 \text{ В} \quad (1.1)$$

$$I_{\text{си.макс}} = 2 * I_{\text{дв.п}} = 2 * 4 = 8 \text{ А} \quad (1.2)$$

$$f_{\text{ср.дв}} = 35 \text{ мкс} \quad (1.3)$$

Рассчитаем допустимые значение силы тока и напряжения, для этого добавим к исходным данным запас, следующим образом:

$$[U_{\text{си}}] = \frac{U_{\text{си.макс}}}{0.75} = \frac{13.2}{0.75} = 17.6 \text{ В} \quad (1.4)$$

$$[I_{\text{си}}] = \frac{I_{\text{си.макс}}}{0.55} = \frac{8}{0.55} = 14.54 \text{ А} \quad (1.5)$$

Выбираем транзистор, параметры которого превосходят допустимые. Предварительно берем микросхему IRF8736PBF которая является MOSFET транзистором в корпусе SO-8. С максимальным напряжением 30 В. Ее достоинством является низкое сопротивление открытого канала, что позволяет избежать разработку теплоотвода.

Согласно спецификации на эту микросхему [7], требуемый нами ток 14.54А возможен для протекания до температуры корпуса 60 градусов. График зависимости силы тока от температуры корпуса представлен на рис. 9.

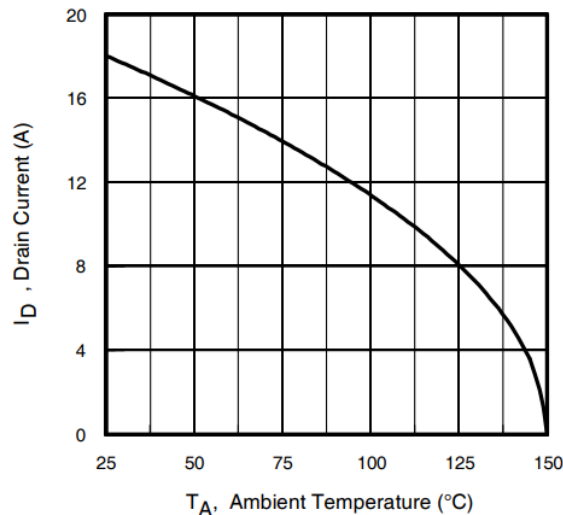


Рис. 9 Зависимость тока стока от температуры корпуса

Таким образом транзистор проходит по току и по напряжению, оценим мощности. Согласно документации сопротивление открытого канала при температуре не более 60 градусов будет составлять 3.9 мОм. Тогда максимальная мощность на транзисторе будет равна

$$P_{\text{си.ст.макс}} = R_{DS(on)} * I_{\text{си.макс}}^2 = 3.9 * 10^{-3} * 8^2 = 0.24 \text{ Вт} \quad (1.6)$$

Для расчета динамических параметров необходимо будет определить времена переключения транзистора. Также, надо рассчитать частоту коммутации ключей. Она была определена как частота ШИМ – 4.5 кГц. Внешнее сопротивление цепи затвора возьмем из рекомендуемой схемы в документации 100 Ом.

Считаем время переключения транзистора

$$t_{\text{перекл}} = C_{rss} * (R_{\text{др}} + R_{\text{з.внеш}} + R_{\text{з.внутр}}) \frac{U_{\text{зи.макс}}}{U_{\text{зи.макс}} - U_{\text{зи.пор}}} =$$

$$= 219 * 10^{-12} * (10 + 15 + 34) \frac{12}{12 - 5} = 22.15 \text{ Нс} \quad (1.7)$$

Внутренне сопротивление затвора было рассчитано по той же формуле для приведенных в спецификациях параметрах. Сопротивление драйвера берется из спецификации.

Считаем динамическую мощность переключения

$$\begin{aligned} P_{\text{дин}} &= I_{\text{си.макс}} * U_{\text{си.макс}} * f \frac{t_{\text{перекл}}}{2} = \\ &= 8 * 13.2 * 4.5 * 10^3 * \frac{22.15 * 10^{-9}}{2} = 0.005 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Суммарная выделяемая мощность

$$P = P_{\text{дин}} + P_{\text{ст}} = 0.005 + 0.24 = 0.245 \text{ Вт} \quad (1.9)$$

Допускаемая выделяемая мощность равна

$$[P] = \frac{P}{0.7 \dots 0.8} = \frac{0.245}{0.75} = 0.326 \text{ Вт} \quad (1.10)$$

Проверяем не перегревается ли транзистор при заданной мощности. Температуру кристалла мы можем посчитать методом термоэлектронной аналогии по формуле

$$T_{\text{кр}} = T_{\text{окр.ср}} + R_{\text{кр-окр.ср}} * [P] = 25 + 62.5 * 0.326 = 45.375 \text{ °C} \quad (1.11)$$

Приведенная температура не перегревает транзистор. Таким образом можем считать что радиатор не понадобится. Обратный диод также не потребуется, достаточно внутреннего диода.

Выбранный MOSFET транзистор обладает высокими частотными свойствами. Проводить проверку по частотным характеристикам не потребуется.

3.2 Гальваническая развязка

Для снижения влияния помех и предотвращения ложного срабатывания драйвера, необходимо осуществить гальваническую развязку между силовой и логической цепями. Для этого могут служить оптические пары, например оптроны. Подберем их.

Итак, как было получено ранее, нам необходимо, чтобы двигатели коммутировались с частотой 4.5 кГц. Тогда получим частотные ограничения на оптроны, исходя из того, что время их включения и выключения в сумме должно

быть меньше, чем 25% длины самого короткого импульса ШИМ, который соответствует напряжению трогания двигателя:

$$(t_{\text{вкл}} + t_{\text{вкл}}) = 0.25 * \frac{U_{\text{трог}}}{U_{\text{ном}}} \frac{1}{f} = 0.25 * \frac{1}{12} * \frac{1}{4.5 * 10^3} = 4.62 \text{ мкс} \quad (2.1)$$

Данному требованию удовлетворяет высокоскоростная оптопара HCPL4504-000E с транзисторным выходом. Выберем её.

Оставшиеся логические выходы работают медленнее и их можно коммутировать с помощью обычной оптопары, выберем 4-х канальную оптопару ради экономии места - TLP291-4_GB_E_T (рис. 10).

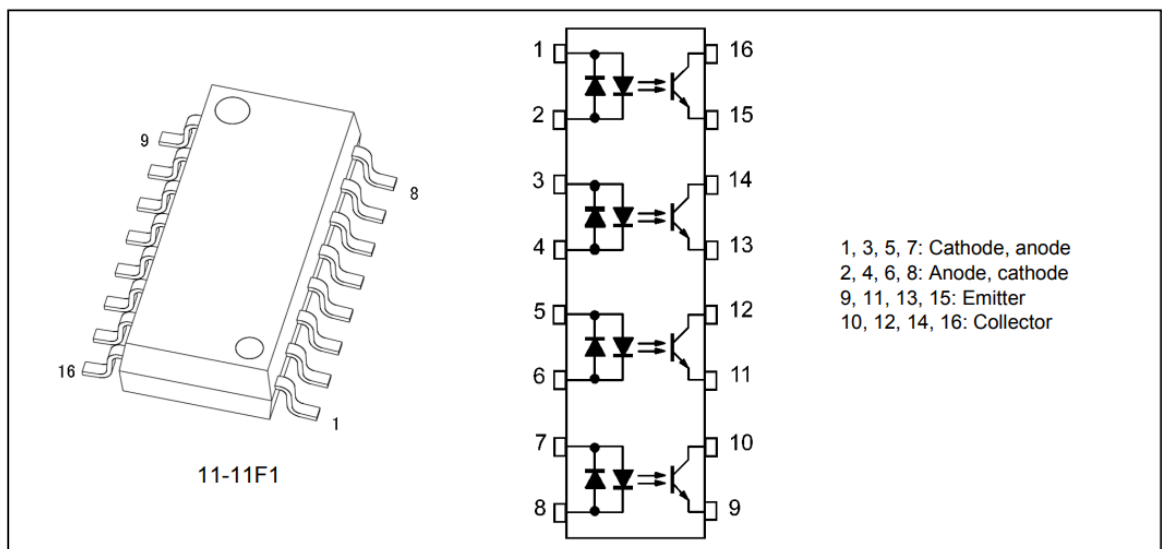


Рис. 10 4-х канальная оптопара TLP291

Далее подберем резисторы для входной и выходной цепи опторазвязки. Для начала необходимо рассчитать входную цепь. Так как оптопара представляет из себя обычный светодиод, необходимо добавить токоограничивающий резистор, в соответствии с рабочим током оптопары. Согласно документации этот рабочий ток 25 мА, напряжение микроконтроллера 3.3 В. Номинальное сопротивление резистора будет равно

$$R = \frac{U_{\text{вх.вкл}}}{I} = \frac{3.3}{25 * 10^{-3}} = 132 \text{ Ом} \quad (2.2)$$

Выбираем ближайшее значение, по ряду E24 берем резистор в корпусе 0603 на 130 Ом. Для 4-х канальной оптопары рабочие токи светодиодов отличаются, рассчитаем аналогично резисторы

$$R = \frac{U_{\text{вх.вкл}}}{I} = \frac{3.3}{50 * 10^{-3}} = 66 \text{ Ом} \quad (2.3)$$

Выбираем ближайшее значение, по ряду E24 берем резистор в корпусе 0603 на 68 Ом.

Для выходной цепи необходимо выбрать резисторы которые будут выполнять роль делителя напряжения. Согласно спецификации на драйвер на цифровых входах максимальное напряжение +5 В.

Необходимо реализовать следующий коэффициент деления

$$k = \frac{U_{\text{цель}}}{U_{\text{пит}}} = \frac{5}{12} = 0.416 \quad (2.4)$$

Предварительно берем резистор на 51 кОм. Тогда второй резистор будет

$$R_2 = \frac{R_1 k}{1 - k} = \frac{51 * 0.416}{1 - 0.416} = 36.3 \text{ кОм} \quad (2.5)$$

Округляем по ряду E24 получаем значение 36 кОм, тогда получаем напряжение

$$U_{\text{итог}} = \frac{U_{\text{пит}} * R_2}{R_1 + R_2} = \frac{12 * 36}{51 + 36} = 4.96 \text{ В} \quad (2.6)$$

Таким образом, считаем что ошибка незначительна, берем эти номинальные значения в корпусах SMD 0603.

4 Выбор микроконтроллера и его подключение

Перейдем к выбору микроконтроллера для нашей системы. Перед этим, сформулируем требования, которым он должен соответствовать учитывая особенности ТЗ. Будущий микроконтроллер должен иметь:

- 2 независимых модуля ШИМ
- 4 свободных цифровых портов для выбора направления вращения и активации
- Интерфейс UART для получения команд
- 2 свободных АЦП канала для получения обратной связи по скорости
- 8 свободных портов для инкрементальных датчиков положения
- 2 модуля таймера с аппаратным счетчиком импульсов инкрементального энкодера
- I2C интерфейс для потенциального подключения IMU модуля

Также необходимо учесть, напряжение питания – 3.3 В.

Всем приведенным требованиям удовлетворяет микроконтроллер компании STMicroelectronics модели STM32G474 [3]. Приведем его основные характеристики в таблице 4.

Таблица 4. Основные характеристики микроконтроллера

Параметр	Характеристика
Объем флеш-памяти	512 КБ
Объем SRAM	96 КБ
Количество таймеров	13 общего назначения и 4 продвинутых по 4 канала каждый
Количество АЦП	5 12-битных до 42 каналов
Тактовая частота	170 МГц
Напряжение питания	2.0-3.6 В

Выбираем микроконтроллер в корпусе LQFP64, в котором предусмотрено 64 контакта из соображений дополнительного запаса.

Продумаем схему подключения микроконтроллера к плате, а также поддержки сброса микроконтроллера при необходимости. Начнем с реализации внешнего сигнала сброса. В нестандартных ситуациях может потребоваться сброс ядра микроконтроллера вручную. Для этого в схему добавим кнопку и керамический конденсатор так, как показано на рис. 11

Figure 27. Recommended NRST pin protection

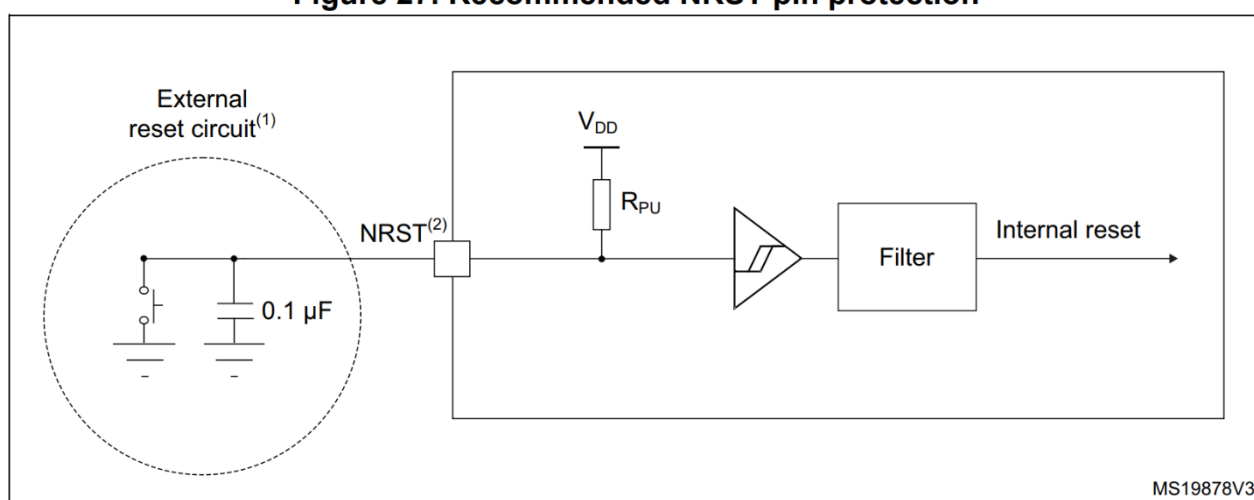


Рис. 11. Порядок коммутации кнопки сброса

Рабочее напряжение конденсатора должно быть, согласно рисунку, не менее V_{DD}, то есть напряжения питания микроконтроллера. Для этого подойдет конденсатор 0.1 мкФ в SMD корпусе 0603, кнопку берем 1437566-3 тоже поверхностного монтажа.

Далее реализуем схему подключения питания. Согласно документации схема питания реализуется как на рис. 12.

Figure 16. Power supply scheme

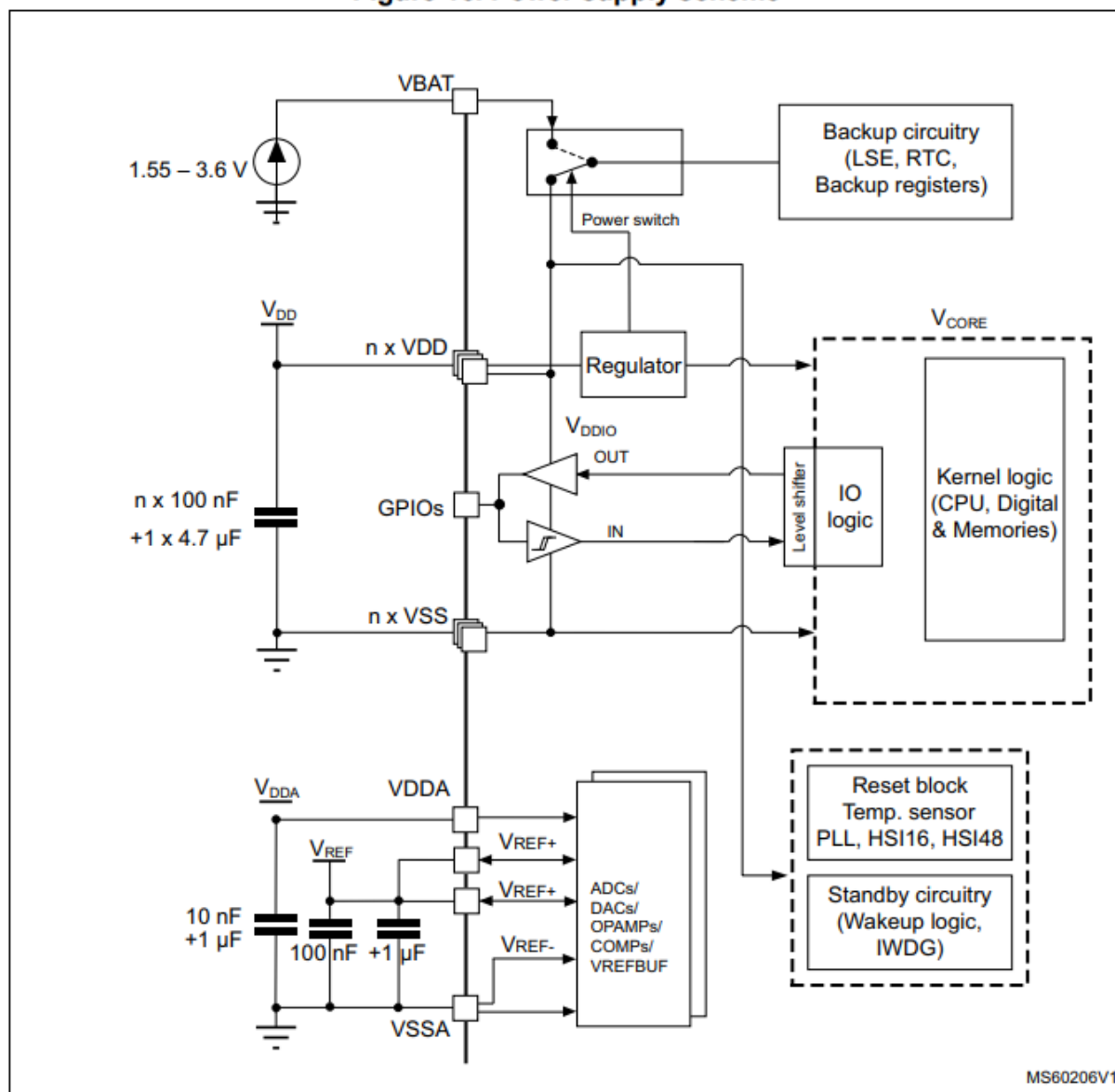
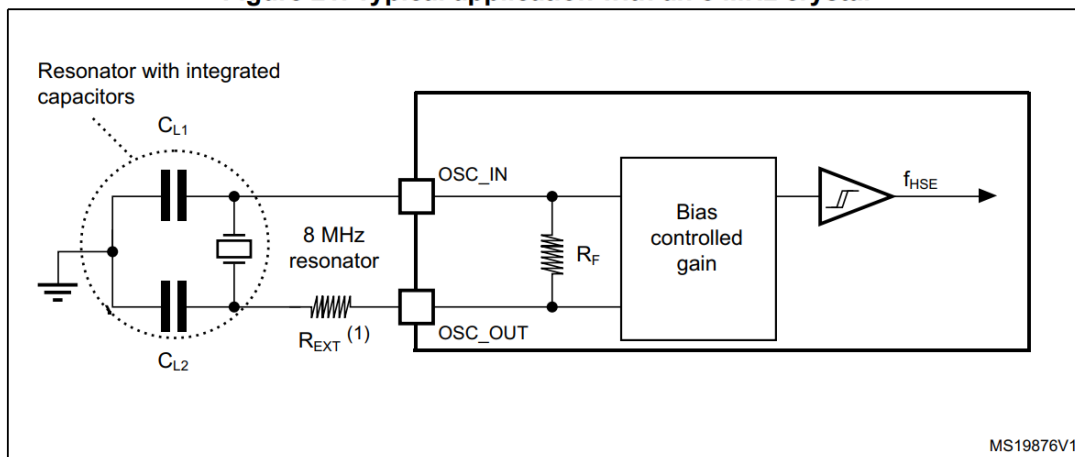


Рис. 12. Схема подключения питания к микроконтроллеру

Таким образом, для коммутации источника питания потребуется 5 конденсаторов на 100 нФ, 1 конденсатор на 10 нФ, 2 конденсатора на 1 мкФ и один конденсатор на 4.7 мкФ . Все их берем керамические поверхностного монтажа в корпусах 0603.

Для обеспечения функционирования МК подключим к нему внешний кварцевый резонатор с частотой 8МГц так, как показано на рис. 13.

Figure 21. Typical application with an 8 MHz crystal



1. R_{EXT} value depends on the crystal characteristics.

Рис. 13. Подключение внешнего источника опорной частоты.

Выберем кварцевый резонатор модели NX5032GA для поверхностного монтажа. Для расчета дополнительных подключаемых компонентов, воспользуемся запиской AN2867 для микроконтроллера [5].

Нагрузочная ёмкость резонатора, согласно его спецификации, составляет 8 пФ. Тогда, приняв паразитную емкость проводников печатной платы, равную 2 пФ, имеем необходимую емкость конденсаторов (при условии их одинаковости):

$$C_{L_{12}} = 2(C_L - C_{\text{пар}}) = 2(8 - 2) = 12 \text{ пФ} \quad (3.1)$$

Таким образом, берем конденсаторы на 12 пФ корпус 0603.

Номинал внешнего резистора можно рассчитать по формуле:

$$R = \frac{1}{2\pi * f * C_{L_{12}}} = \frac{1}{2 * \pi * 8 * 10^6 * 12 * 10^{-9}} = 1.65 \text{ Ом} \quad (3.2)$$

Округляя по ряду E24, получаем номинальное значение 1 Ом. Берем резистор для поверхностного монтажа, так как ток в цепи осциллятора предельно мал.

5 Подключение источника питания и схема питания блока управления

. Для начала выберем понижающий преобразователь на 5 Вольт , это будет LM2575 с фиксированным выходным напряжением 5В. Рекомендуемая схема подключения из документации изображена на рис. 14

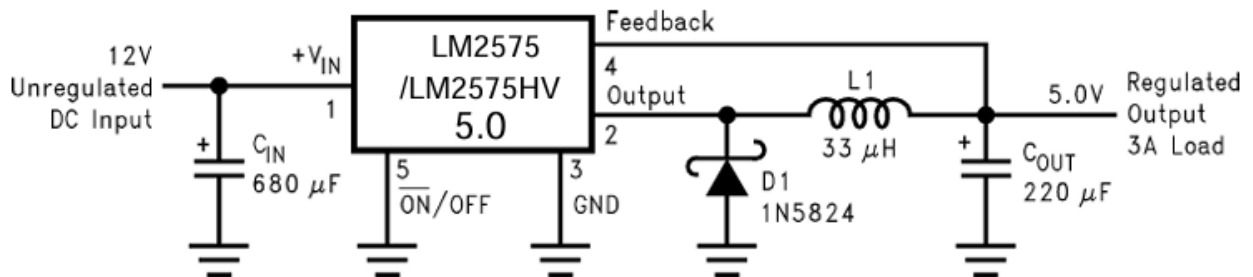


Рис. 14 Схема подключения понижающего преобразователя

Далее выберем преобразователь для обеспечения напряжения питания микроконтроллера 3.3 В. Выбираем RT9193 с фиксированным выходным напряжением 3.3 В, как и предыдущий преобразователь отличается низкой стоимостью и простотой использования. Схема подключения из документации представлена на рис. 15

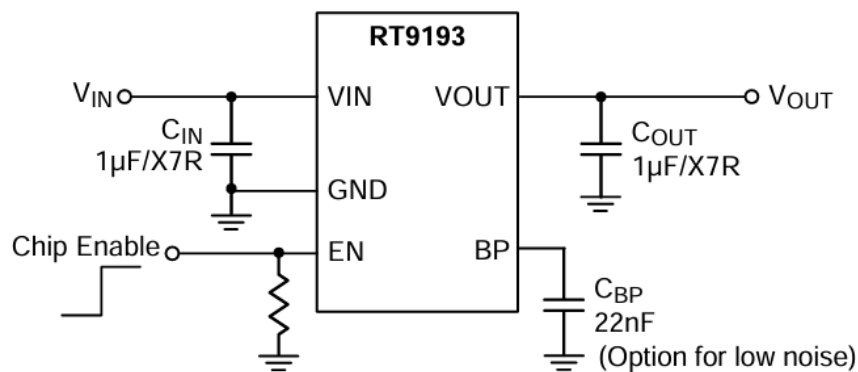


Рис. 15 Схема подключения понижающего преобразователя 3.3В

Таким образом обеспечивается питание логической части блока управления.

6 Выбор коммутаторов внешних компонентов с платой

Для подключения всех внешних устройств к плате необходимо выбрать разъемы, подходящие по напряжению и току, для этого разделим все соединения на несколько классов:

- Разъемы питания
- Подключение двигателей
- Подключение логических входов

Для начала определим разъем питания, напряжение питания 12В, точное потребление тока на данном этапе оценить непросто, но с учетом 2 двигателей и потребления логической части, можно оценить потребление:

$$I = 2 * I_{blac} + I_{dig} = 2 * 4 + 0.2 = 8.4A \quad (4.1)$$

С учетом тока и напряжения выберем разъем XT30PW-M (рис. 16). Его номинальное напряжение 60 В и ток 15 А.

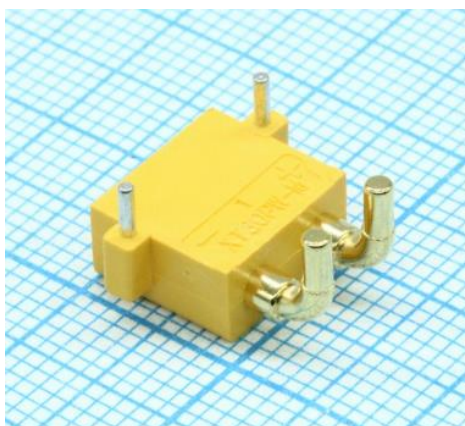


Рис. 16 Разъем питания XT30PW-M

Для подключения двигателей выбираем разъем Micro-Fit 3.0 (рис. 17) на 8 контактов для удобства подключения фаз и датчиков холла двигателя. С номинальным напряжением до 250 В и током 5 А.

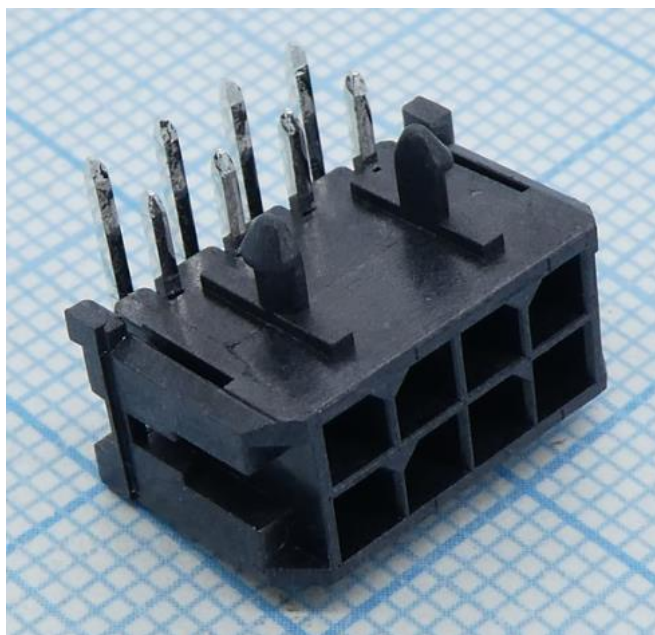


Рис. 17 Разъем MicroFit 3.0

Для остальных логических соединений с небольшим напряжением и током, выбираем маломощные разъемы JST (рис. 18)



Рис. 18 Разъемы JST

Для программирования и отладки будут припаиваться гнезда типа pin header и отпаиваться в готовом изделии.

7 Разработка печатной платы

В этом разделе расчет толщины дорожек

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) DJI LLC Краткое руководство пользователя DJI MATRICE 300 2015. 109 с.
- 2) Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373. с.: ил
- 3) Документация на микроконтроллер STM32G474RBT6.
<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g474rb.html>
(Дата URL: обращения 01.12.24)
- 4) Библиотека компонентов для проектирования печатных плат.
<https://componentsearchengine.com/>
(Дата URL: обращения 01.12.24)
- 5) Приложение о разработке цепи тактирования микроконтроллеров STM AN2867
https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00221665-oscillator-design-guide-for-stm8afals-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf
(Дата URL: обращения 01.12.24)
- 6) Документация микросхемы JY01
https://www.insightcentral.net/attachments/jy01_v3-5_2018-english-pdf.83073/
(Дата URL: обращения 01.12.24)
- 7) Документация транзистора IRF8736PBF
<https://www.infineon.com/dgdl/irf8736pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153560d9e661d7f>
(Дата URL: обращения 01.12.24)
- 8) Документация на оптопару HCPL
<https://static.chipdip.ru/lib/652/DOC005652401.pdf>
(Дата URL: обращения 01.12.24)