

Содержание

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ	10
1.1. Мини роботы	10
1.2. Особенности коллаборативных роботов манипуляторов	11
1.3. Общие требования к система управления робота манипулятора	15
1.4. Система управления Gimbal в роли системы управления роботом	16
1.5. Определение функций и технических характеристик системы управления для мини роботом	16
2 СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА	20
2.1. Особенность иерархической структуры	20
2.2. Структурная схема системы управления мини робота	21
2.3. Структурная схема системы исполнительного управления	23
2.4. Алгоритм работы устройства тактического управления	25
2.5. Алгоритм работы устройства исполнительного управления	28
3 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА	31
3.1. Gimbal двигатель	31
3.2. Энкодер	33
3.3. Устройство стратегического управления	34
3.4. Контроллер тактического и исполнительного управления	36
3.5. Тестирование микроконтроллеров	37
3.6. Силовые ключи	42
3.7. Драйвер силовых ключей	44
3.8. Передатчик шины данных	45
3.9. Преобразователь питания	46
3.10. Функциональная схема системы управления мини роботом	47
3.11. Разработка функциональной схемы системы исполнительного устройства	51
4 ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА	55
4.1. Принципиальная схема устройства исполнительного управления	55

4.2. Принципиальная схема устройства тактического управления	57
REFERENCE LIST	59

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ACD – Устройство исполнительного управления

ADC – Аналого-цифровой преобразователь

BLDC – Brushless Direct Current Motor

BLDC – Бесколлекторный двигатель постоянного тока

CAN – Сеть контроллеров

DC – Постоянный ток

DMA – Прямой доступ к памяти

GPIO – Универсальный ввод/вывод

HAL – Аппаратный абстрактный уровень

I2C – Inter-Integrated Circuit

LED – Светодиод

MCU – Микроконтроллер

MOSFET – Полевой транзистор с металл-оксидным затвором

PID – Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор

PLL – Фазовая автоподстройка частоты

PWM – Pulse-Width Modulation

PWM – Широтно-импульсная модуляция

SCD – Устройство стратегического управления

SPI – Последовательный периферийный интерфейс

SSH – Защищенная оболочка

SVPWM – Пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция

TCD – Устройство тактического управления

UART – Универсальный асинхронный приемник/передатчик

UVLO – Защита от пониженного напряжения

kOPS – Тысяча операций в секунду

BVP – Валовой внутренний продукт

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области механики, электроники и цифровых устройств, привел к созданию инновационных устройств. Это в свою очередь поспособствовало прогрессу, существенному повышению качества и возможностей ранее разработанных решений. Одним из примеров недавних разработок можно считать устройства группы gimbal. Устройство группы Gimbal и представляет собой сложную систему взаимодействия электродвигателей, электроники и датчиков для обеспечения плавности и стабилизации камер. Главной особенностью является использование бесколлекторных электрических двигателей постоянного тока. BLDC моторы обладают высокой эффективностью и мощностью при небольшом весе.

В настоящее время роботы манипуляторы являются главным элементом процесса автоматизации производств. Обуславливается это гибкостью, точностью, скоростью и способностью выполнять поставленные задачи. Однако не во всех сферах роботы заменили ручной труд. Большинство работ связанных со сборкой деталей небольших размеров выполняются людьми. Для выполнения задач такого рода использование существующих универсальных индустриальных роботов является не эффективным и не рациональным решением, виду их большого размера и параметров несоответствующих для работы с мелкими деталями и конструкциями.

Данная работа посвящена разработке системы управления для мини робота на основе двигателей от Gimbal. Актуальность разработки таких систем управления повышается в связи с тенденциями в необходимости разработок мини роботов и использование мини роботов в ближайшие годы.

Работа содержит 5 разделов. В первом разделе производится анализ устройств gimbal, мини роботов манипуляторов, которые доступны на рынке и их характеристики. Исследуются варианты управления двигателями gimbal и производится разработка функций и технических параметров для системы управления мини роботом. Во втором разделе производится разработка структурной схемы на основе иерархической парадигмы управления роботом, а также алгоритма её описания для системы управления мини роботом. В третьем разделе производится разработка функциональной схемы и описание и назначения ее элементов. В четвертом разделе производится разработка принципиальной схемы с ее описанием, расчет элементов схемы. В пятой части производится разработка алгоритмов и программная реализация на микроконтроллере.

1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

1.1. Мини роботы

Активное распространение роботов после середины 20 века привело к автоматизации почти всех аспектов производственных процессов, включая сборку, сварку, покраску, контроль качества и упаковку. Это также оказало значительное влияние на логистику, складское хозяйство и дистрибуцию, где роботизированные системы используются для сортировки, перемещения и хранения товаров. Прогресс в области механики, электроники и цифровых устройств, привел к созданию инновационных устройств. Это в свою очередь способствовало прогрессу, повышению качества и возможностей ранее разработанных решений. Одним из улучшений недавних разработок можно считать появление мини роботов манипуляторов. Хотя стоит отметить, что большинство работ связанных со сборкой деталей небольших размеров до сих пор выполняются людьми. Использование существующих универсальных мини роботов манипуляторов является эффективным и рациональным решением, виду их небольшого размера и параметров соответствующих для работы с мелкими деталями и конструкциями.

Мини роботы манипуляторы представлены на рынке и разработки ведутся в данном направлении ([Li et al. 2022](#)), примером таких роботов могут считаться роботы моделей «MotoMini» от компании «Yaskawa», «Meca500» (Рисунок 1.1) от компании «Mecademic» и другие. Тема мини роботов является актуальной, однако стоит отметить, количество информации, на данный момент, о роботах этого класса крайне небольшое.



Рис. 1.1. Meca500 Robot Arm

Благодаря маленькому размеру всей конструкции, возможно создавать целые производ-

ственные линии прямо на столе. Это открывает новые возможности для мелкосерийного производства и разработки прототипов, где требуется высокая точность и гибкость процессов. Однако, несмотря на преимущества мини-роботов манипуляторов, они обладают недостатками. Главным недостатком является опасность работы роботов совместно с людьми. Для организации работы данных роботов необходимо создавать специальные закрытые рабочие зоны, для минимизации возможного риска, а работа совместно с человеком представляется невозможной. Эта проблема ограничивает область применения мини-роботов, делая их непригодными для задач, где требуется тесное взаимодействие между человеком и машиной особенно при работе с мелкими предметами, требующие участия оператора. Также это снижает гибкость производственных систем, поскольку для изменения конфигурации линии может потребоваться значительное время и ресурсы на переустройство рабочей зоны. Отсутствие коллаборативности является основной проблемой данных типов роботов.

1.2. Особенности коллаборативных роботов манипуляторов

Коллаборативные роботы или коботы - это индустриальный тип робота, оборудованный набором датчиков и фиксирующих устройств, которые помогают с высокой точностью избегать столкновений с людьми и различными препятствиями, даже в случаях неисправности программного обеспечения. Эти устройства разработаны для работы в непосредственной близости с человеком, не требуя размещения в изолированных рабочих зонах. Они так же отличаются простотой программирования, что делает их доступными для использования персоналом без специализированных навыков.

Согласно международному стандарту ISO 10218 (части 1,2) предусматривает четыре основных типа коллаборативных роботов ([Bélanger-Barrette n.d.](#)), которые могут использоваться для совместной работы с человеком.

- С остановочным защитным механизмом. Такие коллаборативные роботы способны работать автономно по введенной управляющей программы, но при появлении человека датчики останавливают его работу. Работа робота продолжается, когда человек покидает рабочую зону;
- С ручным управлением. В присутствии человека такой коллаборативный робот выполняет его команды, подаваемые рукой. Например, команда может подаваться путем касания рукой до определенной части корпуса или распознает движение рук на расстоянии. При отсутствии человека коллаборативный робот может работать автономно, если введена необходимая управляющая программа;

- С «компьютерным зрением». Специальные датчики отслеживают движение людей. При входе человека в рабочую зону устанавливается пониженная, безопасная скорость. Если он приближается слишком близко, то коллаборативный робот останавливает работу;
- С ограниченной силой. Эти короботы при перемещении не сметают все по пути. Если они наталкиваются на препятствие, то останавливаются, в т. ч. при столкновении с человеком. Такие коллаборативные роботы могут использоваться в непосредственной близости от людей.

ISO/TS 15066:2016 представляет собой первый в своем роде документ, устанавливающий критерии безопасности для использования коллаборативных роботов. Разработка этого технического стандарта была осуществлена международным комитетом ISO, в который входили специалисты из 24 стран и представители ведущих производителей робототехники, начиная с 2010 года. Стандарт служит дополнением к уже существующим нормам безопасности промышленных роботов, зафиксированным в ISO 10218-1 и ISO 10218-2, и устанавливает конкретные требования к безопасному взаимодействию между промышленными роботами и людьми в рабочей среде. ISO/TS 15066 предлагает методические рекомендации для проведения оценки рисков, связанных с коллаборативным использованием роботов и человека.

Контролируемая остановка (Safety-rated monitored stop), Этот подход применяется, когда робот в основном работает автономно, однако иногда требуется вмешательство человека в рабочую зону. К примеру, робот может выполнять обработку детали, но в определенный момент процесса необходимо человеческое вмешательство для выполнения задачи, недоступной роботу. В случае входа человека в установленную зону безопасности, робот останавливается, при этом моторы остаются под напряжением и готовы к возобновлению работы. Это критично, так как после выхода человека из зоны безопасности, робот мгновенно продолжает свою деятельность, исключая потребность в полной перезагрузке программы, что могло бы произойти при полной остановке. Такой метод исключает простои в работе робота, которые бы возникали, если бы люди регулярно перемещались через его рабочую зону;

- Остановка обеспечивается без потери мощности двигателей (пауза);
- Оператор может взаимодействовать с роботом;
- Автоматическая работа может возобновиться, когда человек покидает рабочее пространство;
- В один момент времени может двигаться либо человек, либо робот;

- Может использоваться с обычными промышленными роботами, но нужно добавить световые барьеры безопасности (лазерные дальномеры, фотодетекторы).

Ручное ведение (Hand guiding); Этот метод коллaborации применяется при выполнении сложных манипуляций с тяжелыми предметами и может быть адаптирован для использования с традиционными промышленными роботами при добавлении специального устройства. Это устройство, обычно датчик момента, установленный на фланце робота, позволяет ощущать силу, прикладываемую оператором к манипулятору, обеспечивая таким образом возможность более точного управления действиями робота.

- Оператор находится в непосредственном контакте с роботом.
- Робот находится под ручным управлением.
- И человек, и робот могут двигаться одновременно (движения контролируются человеком).
- Могут использоваться обычные промышленные роботы.
- Требуется дополнительное оборудование (датчик момента)

Контроль скорости и разделения (Speed and separation monitoring); В этом подходе к совместной работе рабочее пространство робота ограничено световыми барьерами безопасности, аналогично первому типу коллaborации, которые отслеживают расположение людей вокруг. Основное отличие состоит в цели: в то время как в первом случае основной задачей робота является остановка при приближении человека, в данном сценарии целью является возможность параллельной работы человека и робота. Робот адаптирует свое поведение в соответствии с предварительно заданными зонами в его программе: с уменьшением дистанции до человека робот постепенно снижает скорость своих движений и останавливается при критическом сближении для предотвращения столкновения. Когда человек удаляется, робот возобновляет работу и увеличивает скорость.

- Скорость робота уменьшается, по мере приближения человека.
- Робот останавливается, когда может произойти столкновение с человеком.
- Человек и робот могут перемещаться одновременно.
- Может использоваться с обычными промышленными роботами, но нужно добавить световые барьеры безопасности (лазерные дальномеры, фотодетекторы).

- Используется для операций, требующих частого присутствия персонала

Все описанные выше формы совместной работы могут использоваться с обычными промышленными роботами, при условии наличия дополнительных устройств. Такие решения называются коллаборативные робототехнические системы. Отличие коллаборативного робота в том, что он может не использовать дополнительные (внешние) устройства обеспечения безопасности – они уже встроены в него. Еще одно важное отличие коллаборативных робототехнических систем от коллаборативных роботов состоит в том, что при совместной работе исключается контакт с человеком. А вот коллаборативный робот может контактировать с телом человека без вреда для него. Это достигается за счет ограничения мощности и усилия.

Ограничение мощности и усилия (Power and force limiting). В «суставах» робота находятся датчики момента, которые могут определить факт столкновения с человеком. Если датчики обнаруживают превышение допустимых усилий, робот останавливается. Эти роботы также предназначены для рассеивания сил на широкой поверхности, в случае удара – именно поэтому детали их корпуса чаще всего сделаны с округлыми формами. Функционал по ограничению мощности и силы, как правило, входит в штатное ПО.

Существует интерес к разработкам различных типов BLDC моторов и возможности их использования при разработке робототехнических систем и устройств. Поэтому становится актуальней задачей построение систем управления Gimbal для выполнения робототехнических операций.

Дальнейшее развитие мини роботов возможно только путем улучшении их технических характеристик. При возможности использования компонентов малых размеров с требуемыми параметрами. Важным компонентом механизма мини робота манипулятора является электродвигатель. В поисках лучшего решения разрабатывают с различными вариантами двигателей. Исходя из тенденций последних исследований ([Sakama et al. 2022](#)) рис 1.2 но, что удельная мощность бесщеточных двигателей постоянного тока, с 1990-х годов, увеличилась более чем в десять раз за 20 лет, и теперь бесщеточные двигатели постоянного тока являются электродвигателями с самой высокой удельной мощностью. Удельная мощность данных двигателей увеличилась после появления постоянных магнитов с высокой максимальной энергией. В частности, появление неодимового магнита.

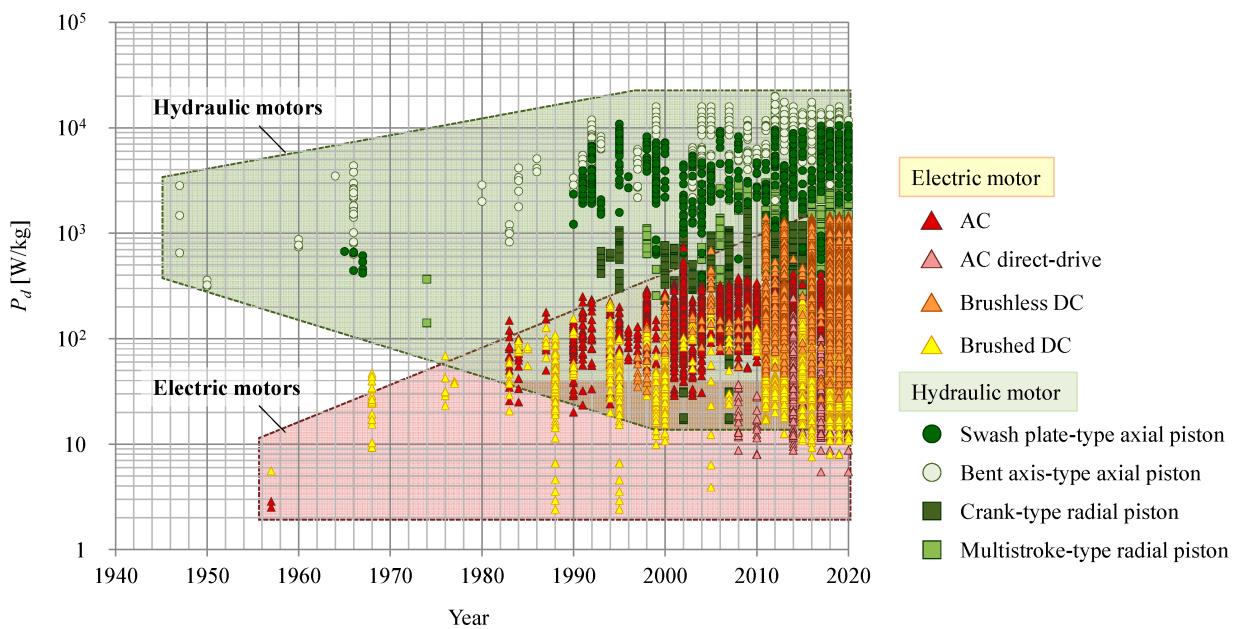


Рис. 1.2. Измерение удельной мощности в электрических двигателях во времени (Sakama et al. 2022)

1.3. Общие требования к системе управления робота манипулятора

Любой робот-манипулятор состоит из различных систем: электронной, механической, вычислительной, сенсорной и других. Система управления робота должна организовывать работу между ними и обеспечить функционирование робота манипулятора по следующим требованиям:

- Точное управление движением, плавное управление движениями робота с большой точностью, включая синхронизацию всех суставов и механизмов;
- Реализация заданных алгоритмов и задач, включает в себя задачи последовательности движений и операций действий робота;
- Обработка сенсорных данных, точно обрабатывать данные с датчиков для адаптации к изменениям окружающей среды;
- Взаимодействие с оператором, возможности для ручного управления и программирования;
- Интеграция с другими системами, робот являясь не только одним элементом на производстве, использование совместно с системами конвейерных линий.

1.4. Система управления Gimbal в роли системы управления роботом

После тщательного изучения требований, которым должен соответствовать робот манипулятор. Возникает логичный вопрос: почему не использовать готовые наработки для стабилизации камер в робототехнике? Сравнительном анализ двух систем показывает методы и принципы управления в общем совпадают. Однако, более детальный анализ выявляет как потенциальные возможности, так и ограничения данного решения. Системы стабилизации камер, как и роботы-манипуляторы используют сложные алгоритмы для контроля положения и движения, но в случаях устройств Gimbal управление можно представить как величин питающего напряжения и частоты с использованием скалярных регуляторов. ([Altan & Hacıoğlu 2020](#)) В тоже время области применения двух систем диаметрально отличаются друг от друга: в системах управления Gimbal не применяются датчики угла поворота оси двигателя, а информацию о значении текущего положении рассчитывается с использованием значений гироскопа и акселерометра. Значений этих датчиков достаточно для обеспечения стабилизации, но не достаточно для определения точного положения управляемого объекта в пространстве, причина тому наличие дрейфа получаемых данных ([Akcayır & Ozkazanc 2003](#)). Можно использовать алгоритмы фильтрования данных для уменьшения погрешностей управления, но это усложняет систему управления. Привлекательно является применение более простых и надёжных решения управления.

Если нет возможности использования системы управления от Gimbal по ряду причин, указанных выше, то тогда целесообразно разработать систему управления роботом на основе двигателей Gimbal Motors учитывая их достоинства (значительная мощность при маленьких габаритах) в системах стабилизации камер, а при учитывании актуальности использования мини роботов в целом. Актуальность разработки таких систем управления повышается в связи с тенденциями в необходимости разработок мини роботов и использование мини роботов в ближайшие годы.

Эта актуальность определила целью работы. Целью работы является разработка системы управления мини роботом манипулятором на основе Gimbal motors.

1.5. Определение функций и технических характеристик системы управления для мини роботом

Перед определением функций и технических характеристик системы для управления мини роботом на основе Gimbal motors. Необходимо понять каким типам относится данные двигатели и как ими управлять. Двигатели данной категории являются бесщёточными и состоят

из ротора (магнита) и статора (катушек). Подключение бесщеточных двигателей производится тремя фазами. Поскольку управление осуществляется тремя фазами, последовательное приложение напряжения к обмоткам создает роторное магнитное поле, которое "бежит" вокруг статора, и это вращающееся поле заставляет ротор вращаться, следя за ним. Так как двигатели управляются постоянным напряжением через три фазы, можно получить только 6 устойчивых положений ротора в магнитном поле. При использовании 6 шаговой коммутации не обеспечивается плавное вращение. Gimbal представляют конструкцию многополюсных двигателей, за счет чего увеличивается возможное положение ротора, но для получения плавности комбинировать данные двигатели с алгоритмами векторного регулирования. Возможности к полностью предотвращения заеданий для компенсации крутящего момента при плавном управлении.

Система управления мини роботом манипулятором должна обеспечивать функциям:

- Расчёт траектории движения, решение кинематических задач;
- Точное и плавное управление движением двигателем используя алгоритм векторного регулирования с обратной связью;
- Управление скоростью, ускорением, моментом электродвигателя;
- Ограничение минимальных и максимальных параметров скорости, ускорения и позиции, тока напряжения.
- Обработка данных с различных датчиков в реальном времени;
- Визуальное отображение состояния робота.
- Возможность интеграции с другими системами.
- Мониторинг температуры и отключение устройства при высоких температурах.

Разрабатывать систему управления для мини робота манипулятора невозможно в отрыве от конструкции самого робота. На основе анализа, выполненного в разделе 1.2. Было определено, что система управления мини роботом манипулятором с использованием Gimbal motors, должна иметь технические характеристики, соответствующие характеристикам существующих мини роботов. Конструкция робота - 6 осевой робот манипулятор: шесть степеней свободы необходимо для приближенной имитации возможных движений человеческой руки. Для разработки системы управления мини роботом манипулятором взята наиболее часто встречающаяся кинематическая структура, приведена на рисунке 1.3.

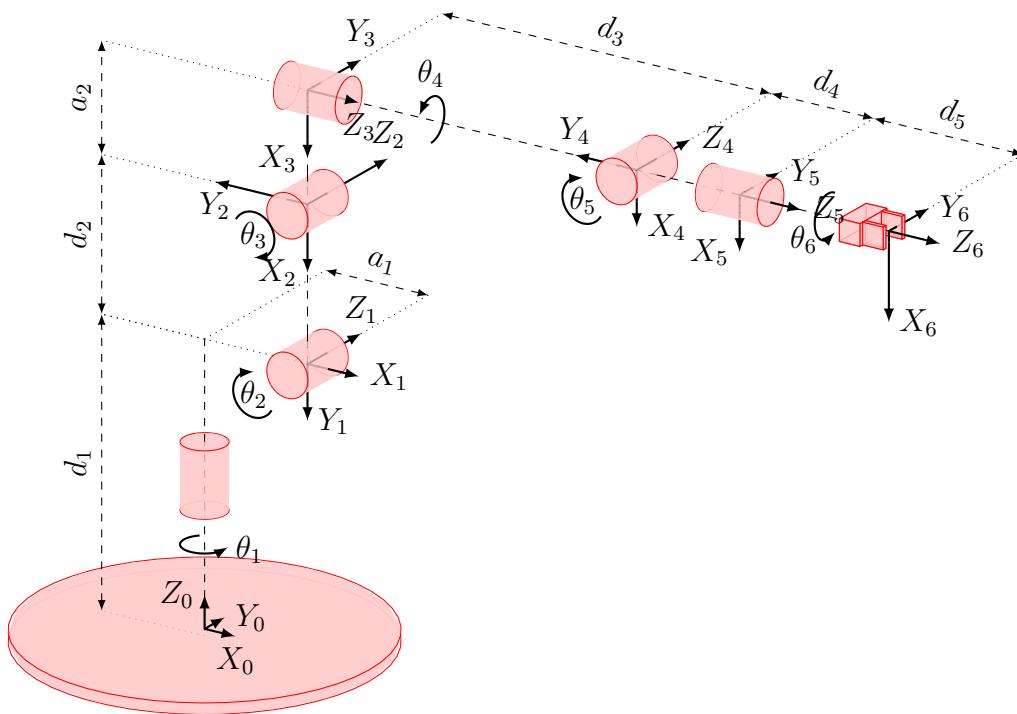


Рис. 1.3. Кинематическая структура мини робота

Параметры кинематической структуры:

- d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 - расстояния между звеньями;;;
- $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ - углы звеньев; • a_1, a_2 - длины звеньев;
- X_0, Y_0, Z_0 - базовые координаты;
- X_6, Y_6, Z_6 - координаты инструмента.

Технические характеристики:

- Количество осей – 6 осей;
- Точность перемещения осей 0.02 мм;
- Ограничение максимальной рабочей температуры: 80 °;
- Ограничение максимального тока двигателя до 25 А;
- Размер системы управления не должна превышать размера 300x300mm;
- Масса системы управления, не должна превышать 5 кг;
- Минимальная скорость поворота оси не менее 150 °/с;

- Средняя мощность потребления <200W;
- Рабочее напряжение 24В.

2 СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА

2.1. Особенность иерархической структуры

Для разработки структурной схемы системы управления мини робота манипулятора была использована иерархическая парадигма архитектуры систем управления роботами. Согласно этой парадигме, иерархическая архитектура системы управления роботом (рис. 2.1), в общем случае, содержит четыре уровня управления: интеллектуальный уровень, стратегический уровень, тактический уровень и исполнительный уровень([\(Khatib et al. 1997\)](#)).

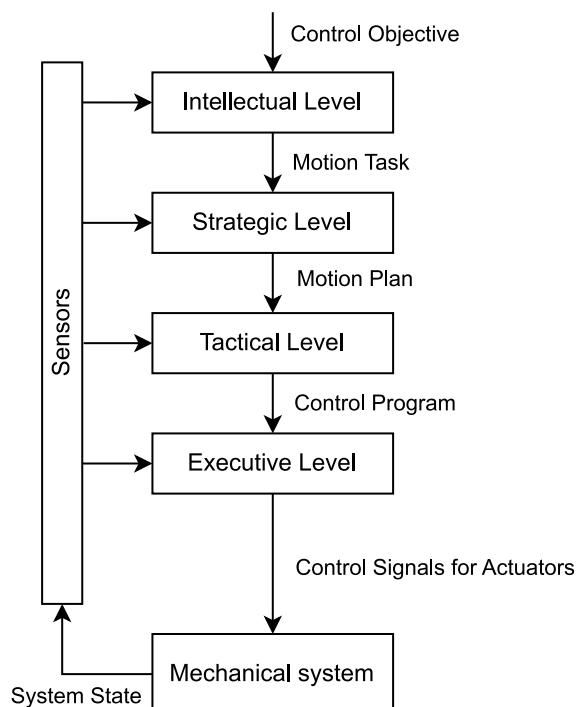


Рис. 2.1. Иерархическая архитектура системы управления роботом

В иерархической архитектуре системы управления роботом манипулятором уровни управления обеспечивают выполнение специфических задач управления роботом:

- На интеллектуальном уровне вырабатываются (формируются) решения о выполнении действий роботом манипулятором в условиях неполной информации о внешней среде и объектах, на которые робот воздействует (например, перемещение объекта из одной точки пространства в другую, обработка детали и т.д.).
- Стратегический уровень управления предназначен для планирования движений робота манипулятора: разделение задачи действия, выработанной на интеллектуальном уровне, на последовательность согласованных во времени элементарных действий (движений) и

формализацию целей управления для каждого из этих действий. Стратегический уровень выдает тактическому уровню план движения в форме команд управления движением. Например, вывод рабочего органа (захватывающего устройства) робота в заданную позицию, захват объекта, тестовое движение для определения сил реакции со стороны объекта, перемещение объекта и возвращение робота в исходную позицию.

- На тактическом уровне выполняется преобразование команд управления движением, поступающих со стратегического уровня управления, в программу управления, которая определяет законы согласованного движения во времени всех звеньев робота с учетом технических характеристик блока приводов (в первую очередь ограничений на обобщенные скорости, ускорения и силы). Для выполнения команды позиционного управления движением робота манипулятора на тактическом уровне необходимо определить обобщенные координаты манипулятора, которые соответствуют желаемым декартовым координатам характеристической точки захватывающего устройства робота манипулятора. Для этого решается обратная кинематическая задача о положении манипулятора в заданной точке траектории движения.
- Исполнительный уровень управления предназначен для расчета и выдачи управляющих сигналов на блок приводов робота манипулятора в соответствии с программой управления, созданной на тактическом уровне, и с учетом технических характеристик исполнительных устройств.

2.2. Структурная схема системы управления мини робота

Рисунок 2.2 иллюстрирует структурную схему системы управления мини роботом. Система управления для мини робота манипулятора имеет иерархическую структуру, которая соответствует иерархической архитектуре системы управления роботом (рис. 2.1), так как в разработанной структурной схеме есть устройства, соответствующие функциям уровней управления на (рис.2.1):

1. Устройство стратегического управления (SCD)
2. Устройство тактического управления (TCD)
3. Устройства исполнительного управления (ACD)

Устройство тактического управления (TCD) мини роботом, координирует работу всех устройств системы управления мини роботом, обеспечивая эффективное функционирование

всего механизма робота. Оно выполняет обработку управляющих команд с устройства стратегического управления (SCD) и отвечает за формирование выходных сигналов на устройства исполнительного управления (ACD), обеспечивая соответствие поведения робота с заданными командами.

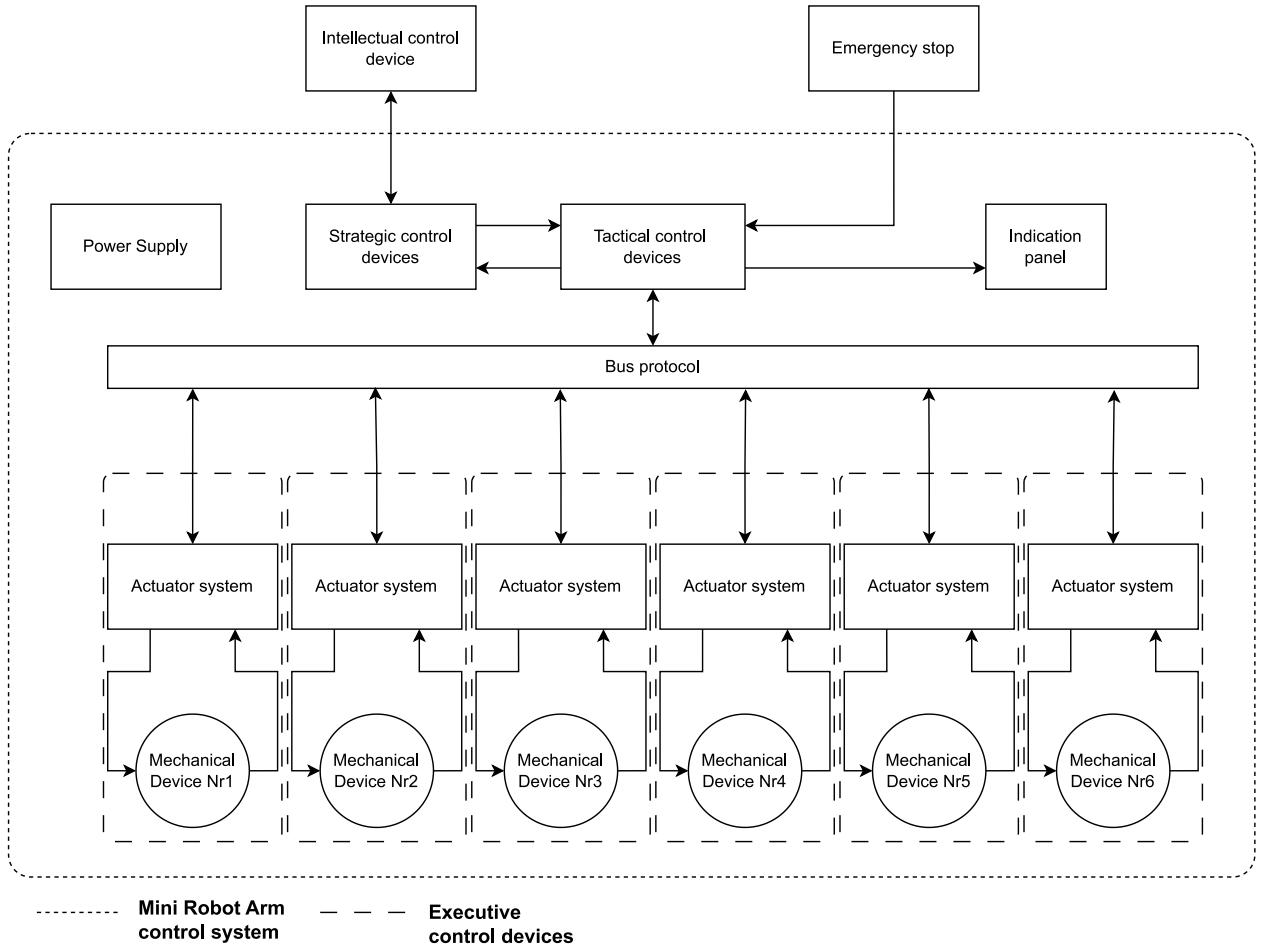


Рис. 2.2. Структурная схема системы управления мини робота

Устройство исполнительного управления (ACD) — это устройство, главная цель которого формирование сигналов для точного управления отдельного механического устройства (электродвигателем), обеспечивая поворот плеча робота манипулятора. Данное устройство позволяет выполнять управление двигателем без использования устройства тактического управления (TCD). Благодаря этому можно производить сложные манипуляции с высокой степенью точности и осуществлять поворот осью двигателя на требуемый угол.

После получения данных от устройства стратегического управления (SCD) устройство тактического управления (TCD) отправляет данные на систему управления двигателя каждой из осей (ACD).

После получения команды на движение происходит расчёт позиций, ускорений, а также отправка данных на систему управления движением (ACD) каждой оси. В случае выхода

контролируемых параметров за диапазон разрешённых значений улавливается режим аварии и происходит вывод информации на информационную панель.

Панель индикации предоставляет информацию о текущих параметрах и состояний систем, а также о состоянии системы робота. Устройство облегчает мониторинг состояния робота манипулятора и обеспечивает быстрое выявление проблем, путём уведомления оператора. Когда система определяет невозможное дальнейшее движение робота, выполняется индикация красным цветом, цвет ожидания жёлтым, а работу зелёным.

Источник питания является неотъемлемым элементом системы. Так как он, преобразует сетевое электричество, путём формирования значений величины тока и напряжения (24В) до требуемых, для снабжения питанием всех электрических устройств робота.

Преобразователь напряжения необходим для изменения уровней питающего напряжения до требуемых параметров, так как различные устройства имеют различные значения допустимых параметров питающих напряжений и тока.

Электродвигатели постоянного тока синхронного типа, преобразуют электрическую энергию в механическую. Они обеспечивают движение различных осей робота манипулятора.

Устройство экстренного выключения, используется для мгновенной остановки робота в экстренных ситуациях, предотвращая аварии и повреждения конструкций.

Шина передачи данных обеспечивает коммуникацию между устройством тактического управления (TCD) и устройствами исполнительного управления (ACD). Данная коммуникация позволяет эффективно координировать действия всех устройств управления движением (ACD) между собой, а также производить одновременную синхронизацию во время движения.

2.3. Структурная схема системы исполнительного управления

Структурная схема систем управления движением осью изображена на рисунке 2.3. Назначение данной системы непосредственное управление синхронным двигателем и контроль его параметров. Главными элементами управления системой является устройства исполнительного управления (ACD). Поскольку для управления электродвигателем, необходимы сигналы с регулированием частоты и фазы, и именно ACD формирует управляющие PWM сигналы.

Драйвера увеличивают мощность управляющих PWM сигналов, тем самым обеспечивая согласование сигнала ACD и выходных силовых транзисторов. Драйверы позволяют производить своевременное и безопасное переключение транзисторов инвертора.

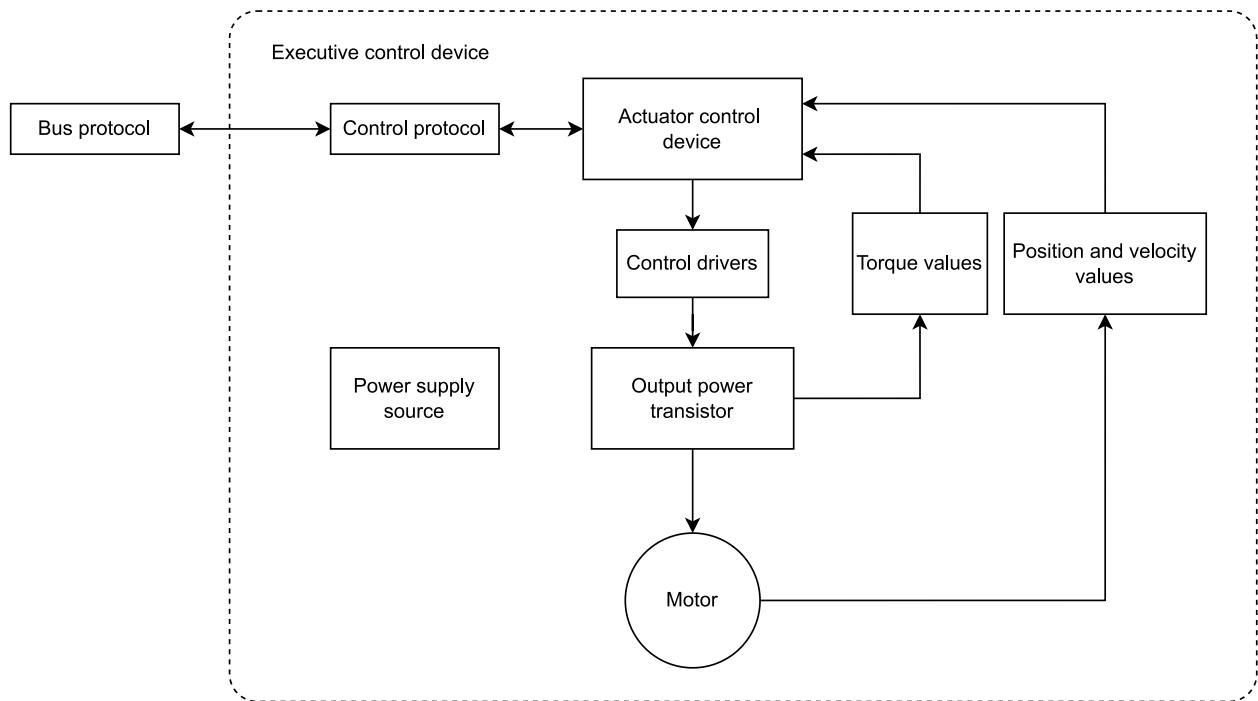


Рис. 2.3. Структурная схема устройства исполнительного управления

Сигналы, подаваемые на электродвигатель, контролируются силовыми ключевыми транзисторами. Электродвигатель необходимо регулировать путем изменения частоты и фазы сигнала

Силовые транзисторы образуют трехфазный мостовой инвертор напряжения и режим работы транзисторов — ключевой. В этом режиме транзисторы переключаются между полностью открытым и полностью закрытым состоянием, это обеспечивает высокий КПД и минимизирует нагрев транзисторов, что особенно важно при создании устройства небольшого размера.

Формирование PWM сигналов выполняется с использованием значений текущего угла поворота оси, ускорения и момента на двигателе. Путем изменения ширины импульсов PWM, система управления АСД может регулировать количество энергии, подаваемой на двигатель, тем самым изменяя параметры скорости и момента.

Преобразователь напряжения, обеспечивает формирование питающих напряжений для различных устройств. Тип преобразователя – DC/DC преобразователь, а преобразуемое напряжение – это напряжение 24В общего источника электропитания. В системе присутствуют различные компоненты с различными уровнями питающего напряжения, поэтому подавать питающее напряжение извне является не эффективным способом.

Шина данных позволяет производить передачу данных между различными устройствами, за счёт соединения компонентов в единую сеть. Благодаря использованию сети появляется возможность производить обмен данными как с одним, так и с несколькими устройствами одновременно.

2.4. Алгоритм работы устройства тактического управления

На рисунке 2.4 изображён главный алгоритм работы устройства тактического управления, главной задачей которого является управление двигателем одной оси робота. По умолчанию, при включении системы, происходит инициализация системы, она подразумевает проверку работоспособности коммуникаций между устройствами и проверку некритического состояния каждого устройства ACD и двигателя. В качестве последнего шага, выполняется инициализация и установка параметров панели индикации.

Если связь с двигателями и интерфейсом управления ACD не нормализовалась, то система управления будет находиться в режиме ожидания до момента восстановления связи. После успешного соединения со всеми устройствами робота происходит установка и отправка команд на исполнительные устройства ACD, минимального значения скорости, угла и ускорения поворота для каждой оси робота. Так как положение осей робота манипулятора после предыдущего выключения неизвестно, необходимо выполнить калибровку всех осей. Калибровка происходит после получения команды разрешения со стороны устройства стратегического управления (SCD).

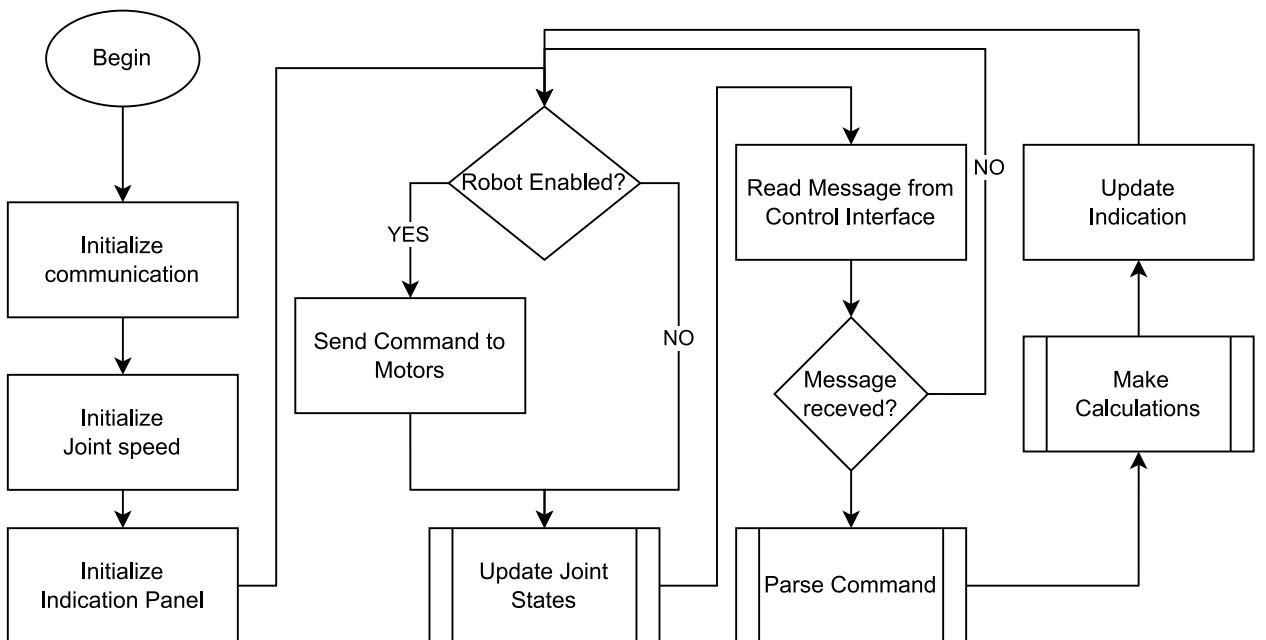


Рис. 2.4. Алгоритм работы устройства тактического управления

В варианте работы системы с поднятым флагом включённого состояния робота, после получения соответствующей команды, происходит считывание углов каждой из осей и отправка команд на ACD в зависимости от произведённых вычислений. Таким образом, устройство стратегического управления (SCD) не участвует в расчётах построения пути, а только отправляет данные на устройство тактического управления (TCD).

На изображении 2.5 иллюстрируется алгоритм «Parse command». После получения команды со стороны (SCD) происходит выполнение расчёта вида движения. Расчёт включает в себя набор алгоритмов вида прямолинейного (Move L) и осевого (Move J) движения. В случае получения команд, связанных с действиями робота, например данных об углах поворота или момента каждой из осей, система посыпает команду на опрос устройств ACD. Устройство TCD ожидает подтверждения на отосланную команду (ACK command). После этого заканчивается применение алгоритма «Parse command» и происходит переход в «Make calcualtion».

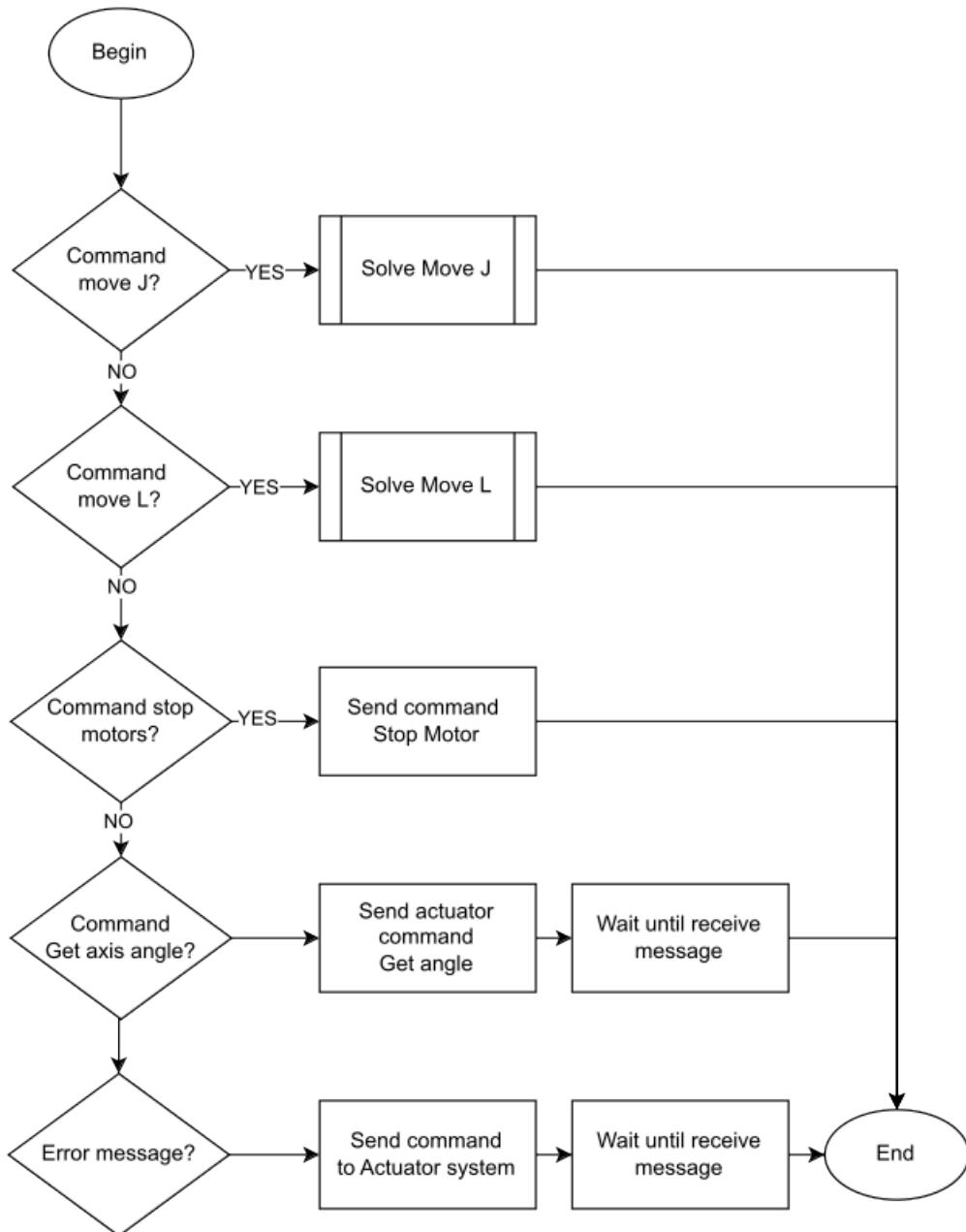


Рис. 2.5. Алгоритм «Parse command»

Основная подпрограмма расчёта траектории движения является, команда "Move J" рисунок 2.6. Основная суть - выполнение движения в определённую позицию более быстрым спосо-

бом с использованием угловых перемещений. В реализации данной функции происходит расчёт ускорений для каждой оси робота, но только в случае допустимых значений углов планируемой точки.

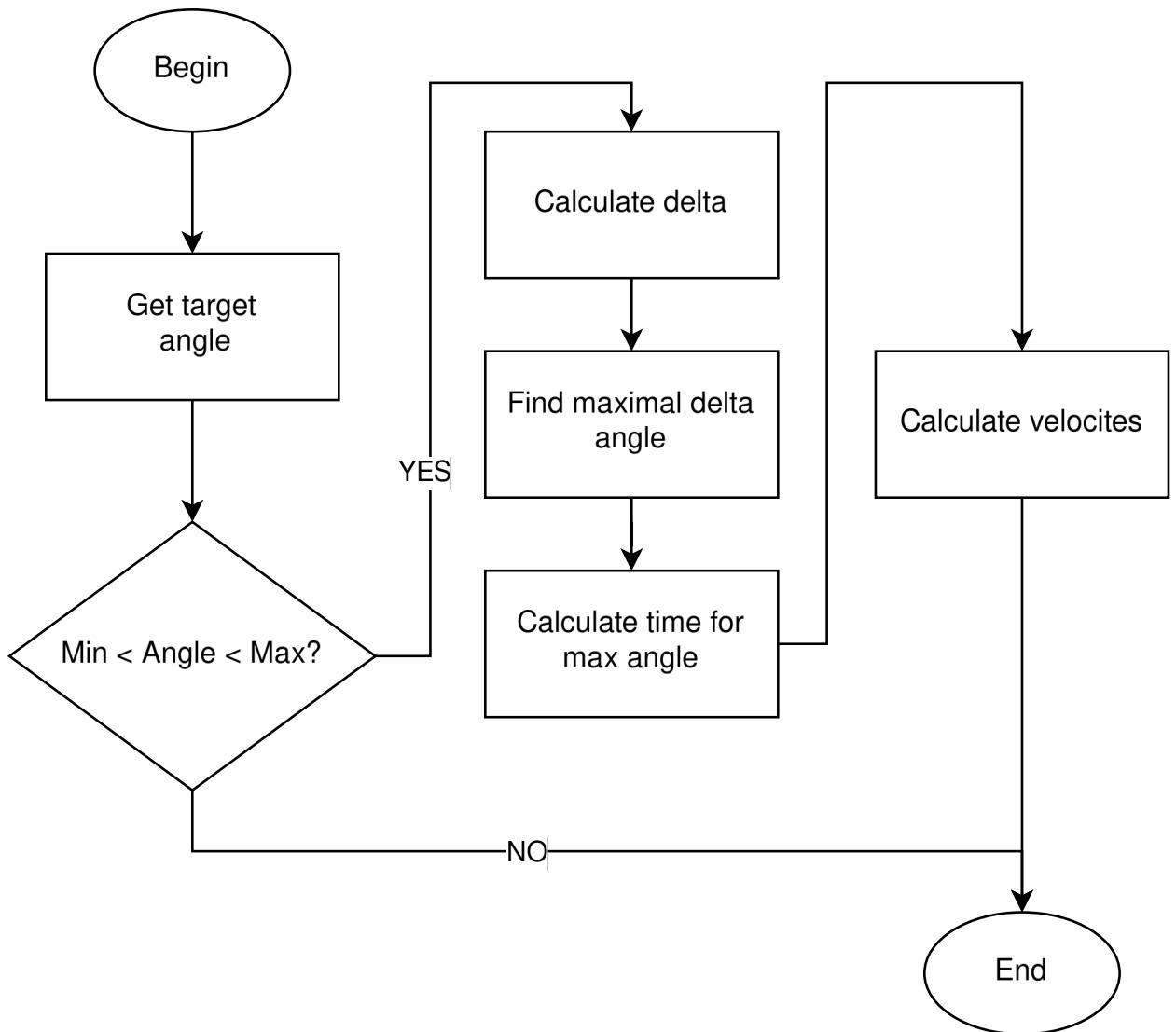


Рис. 2.6. Алгоритм подпрограммы «Move J»

Подпрограмма расчёта траектории движения, является командой вычисления линейного движения («Move L», рисунок 2.7), руки робота. В наборе алгоритмов выполняется решение обратной задачи, результатом данной задачи является несколько вариантов позиций, углов поворота звеньев робота. Далее требуется формирование списка вариантов позиций робота, которые не будут выходить за границы физических ограничений каждой оси робота. Так же требуется расчёт наименьшего угла от начальной позиции робота.

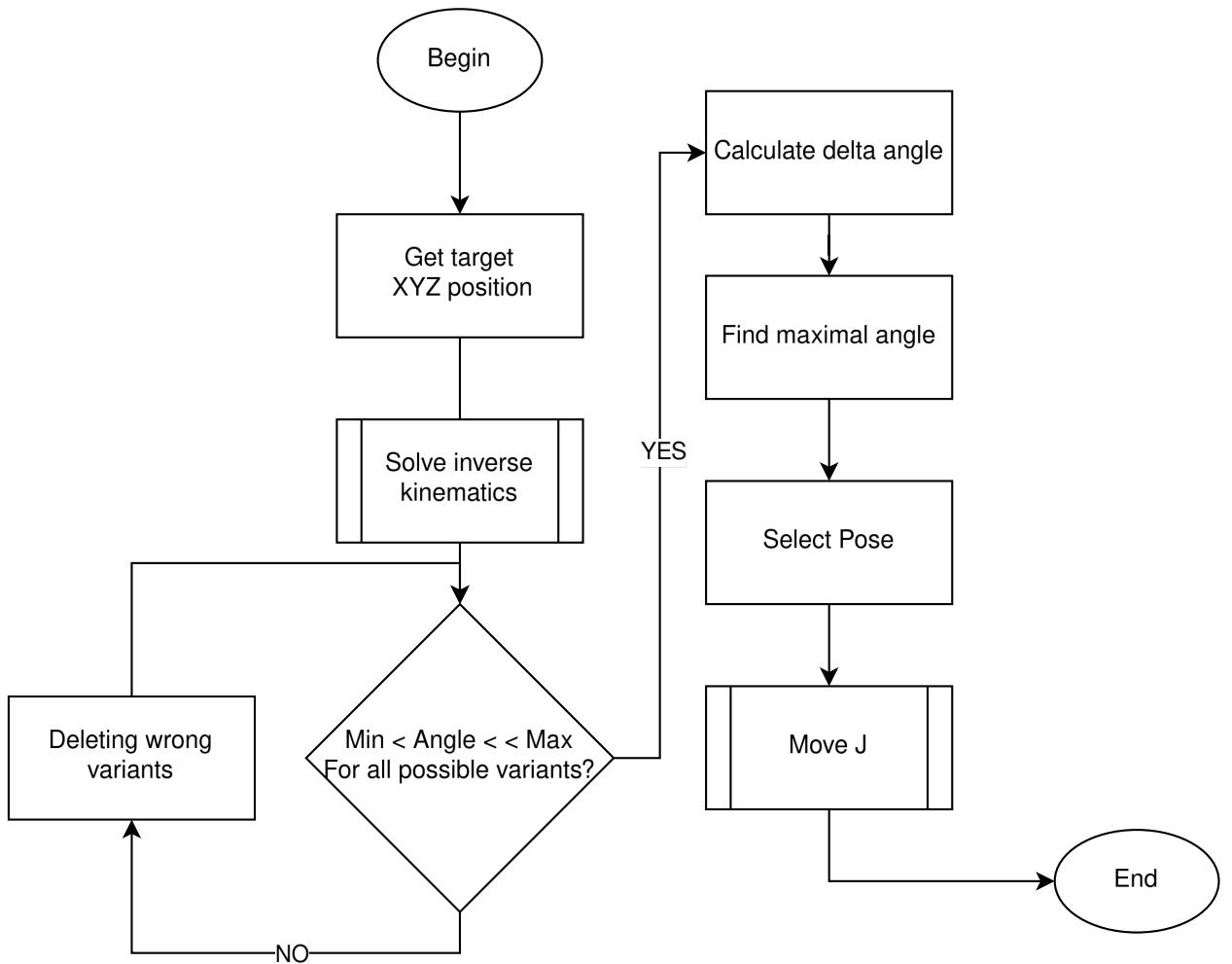


Рис. 2.7. Алгоритм подпрограммы «Move L»

2.5. Алгоритм работы устройства исполнительного управления

Алгоритм устройства исполнительного управления демонстрируется на рисунке 2.8. Дан- ный алгоритм предназначен для управления электродвигателем постоянного тока синхронного типа, который отвечает за поворот управляемой оси робота на определённый угол, и контроля его параметров.

После включения системы происходит инициализация движения внутренней и внешней периферии. Если инициализация прошла успешно и связь установлена, то происходит проверка необходимости калибровки электродвигателя. Выполнение функции калибровки зависит от набора и значений параметров исполняемой программы. Калибровка необходима, если ось робота подвергалась разборке и было изменено положение устройства измерения угла поворота относительно исходного положения оси.

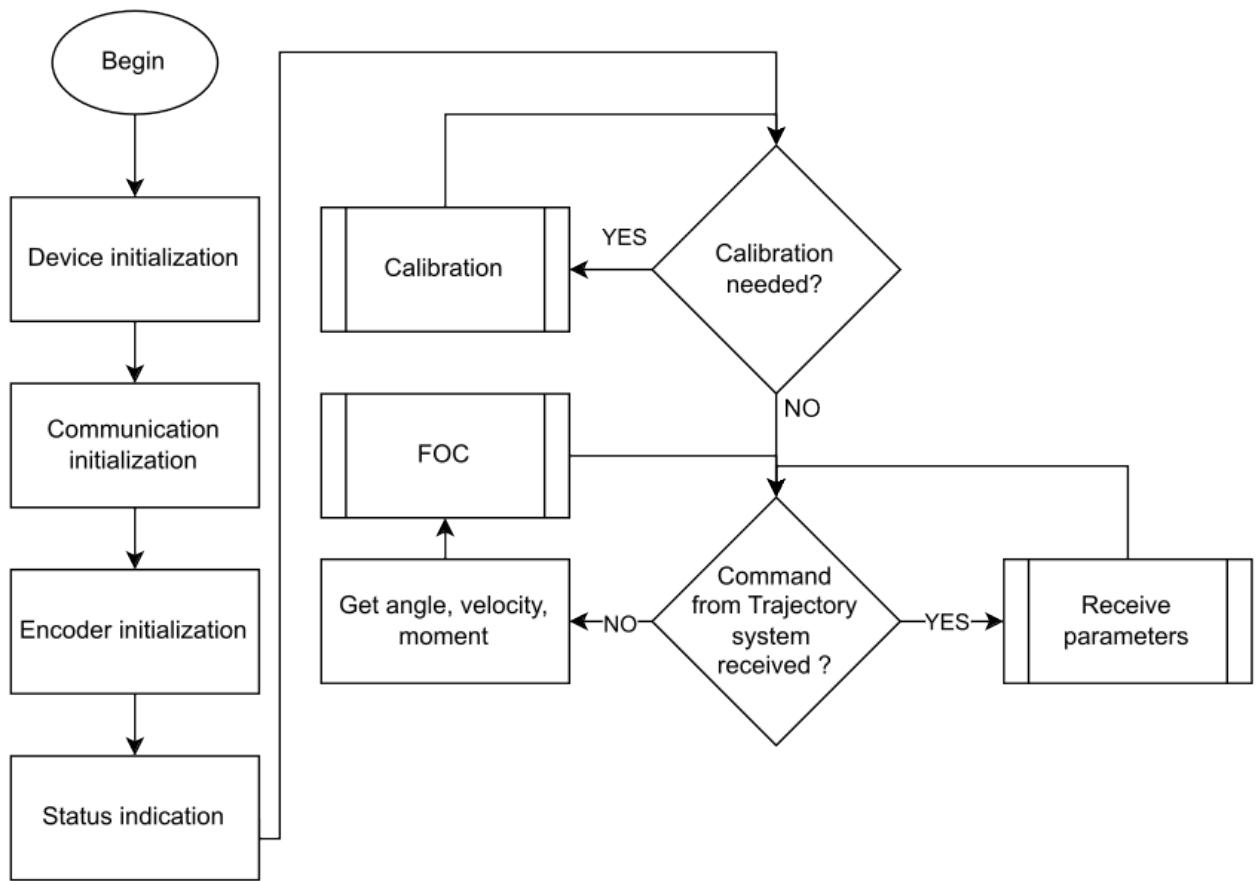


Рис. 2.8. Алгоритм работы «Actuator control device»

Далее с определённой периодичностью происходит опрос значений энкодера, которые преобразуются в углы поворота оси двигателя. Данные параметры необходимы в алгоритме расчёта векторного управления. При успешном вычислении параметров векторного управления происходит генерация выходных сигналов на драйвер.

На рисунке 2.9 изображён алгоритм обработки сообщений. Если сообщение от устройства тактического управления (TCD) было получено, то выполняется процесс извлечения данных из сообщения, которые содержат информацию о необходимой позиции, скорости и коэффициентах регулятора. Данные используются для вычисления параметров векторного регулирования. В случае получения сообщения на запрос данных, производится отправка параметров на устройство отправителя сообщения.

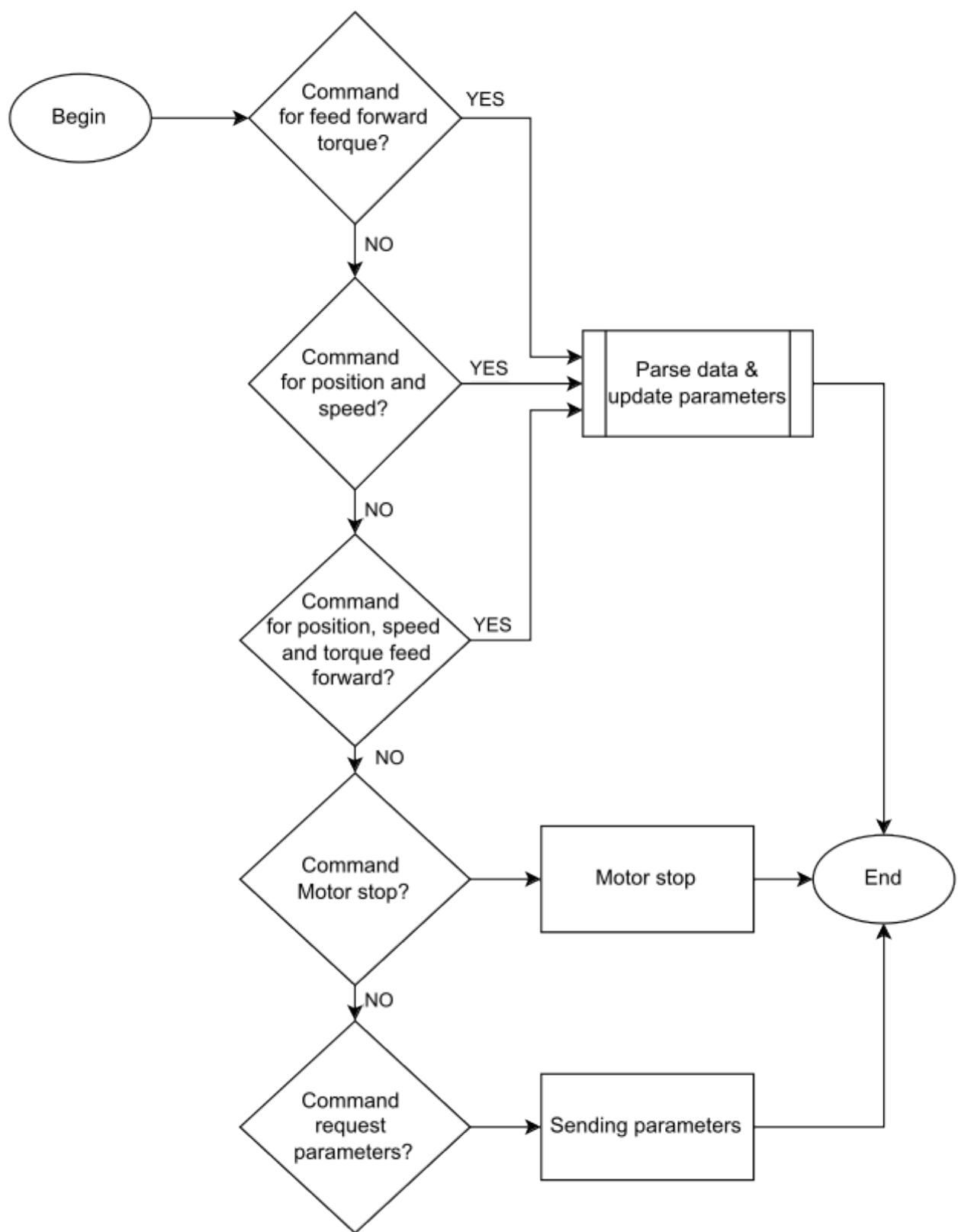


Рис. 2.9. Алгоритм работы подпрограммы «Receive parameters»

3 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА

Проектируемая система предназначена для выполнения задач управления робота манипулятором. Нецелесообразно размещать устройства исполнительной управления (ACK) в одном месте ввиду их количества. Поэтому целесообразно решение располагать устройства исполнительной части (ACK) вблизи электродвигателя для обеспечения своевременного и точного отклика на управляющие команды, а также для уменьшения электромагнитных помех и потерь мощности на проводах. Так же близкое расположение способствует упрощению обслуживания и повышению надежности системы управления в целом.

3.1. Gimbal двигатель

Gimbal электродвигатель в роботе является одним из компонентов механической части оси манипулятора. Двигатель выполняет передачу крутящего момента на ось манипулятора. Это усилие используется для перемещения различных частей робота, таких как звенья и суставы. В большинстве случаев для увеличения крутящего момента между двигателем и осью робота применяется редуктор (или передаточный механизм). Редуктор снижает скорость вращения выходного вала двигателя, увеличивая при этом крутящий момент. Так как прямое соединение двигателя с осью может не обеспечить достаточного усилия или может быть слишком быстрым для точных манипуляций.

Нагрузка, действующая на каждую ось, определяет требуемый крутящий момент, следовательно, был проведен выбор подходящего двигателя и редуктора для каждой оси. Учитывались габариты двигателя, ведь каждое последующее звено, начиная от первой оси и заканчивая последней должно быть легче и компактнее, обусловлено это необходимостью снижения нагрузки на двигатели и распределением массы самой конструкции. Исходя из технических требований, представленных в главе 1, необходимо использовать двигатели нескольких моделей.

Синхронные электродвигатели должны следующим требованиям :

- Внутреннее сопротивление примерно 10 Ом, для уменьшения нагрева электродвигателя с учётом габаритов;
- Высокий крутящий момент на низких скоростях, характеристика Kv менее 200 единиц;
- Рабочее напряжение от 10 до 20 В;
- Малый вес при моменте силы более 1.0 [кгс·см].

По результатам анализа моделей с различными параметрами в конструкции робота использовать электродвигатели от карданный шарниров камер (Gimbal). Модели данной категории двигателей обеспечивают оптимальный баланс между крутящим моментом и низкой скоростью вращения. Были выбраны модели GBM4008H-150T, GM5208-120T и GM3506 которые изображены на Рисунке 3.1. В данных моделях электродвигателей характерной особенностью является количество пар полюсов магнита и катушек ротора - более 20 (Таблица 3.1), так как скорость двигателя обратно пропорциональна числу полюсов ротора можно получить больший крутящий момент при низкой скорости вращения двигателя. Данные двигатели имеют большой крутящий момент при сравнительным небольшим весе до 200 граммов. Достоинством данных электродвигателей является широкий диапазон рабочих температур от -20° до $+60^{\circ}$ (simplefoc 2023).



Рис. 3.1. «BLDC Gimbal motor GBM4008H-150T»

Таблица 3.1
Технические параметры моторов GBM4008H-150T, GM5208-120T и GM3506

Model	Diameter [mm]	Height [mm]	Weight [g]	Kv	Poles & Magnets	Resist. [ohms]	Torque [kgf-cm]	Max power [W]
GBM4008H-150T	46±0.05	21±0.2	107±0.5	68	24N22P	6.7	1.2	40
GM5208-120T	63±0.05	22.7±0.2	195±0.5	68	24N22P	6.7	1.9	40
GM3506	40±0.05	17.8±0.2	64±0.5	40	24N22P	5.6	1	25

3.2. Энкодер

В разработке системы управления робота манипулятора важную роль играет точное определение углов поворота его частей. Так же необходимо определять положение ротора электродвигателя для более плавного управления. Для определения угла поворота обычно используются энкодеры ([sciencedirect 2023](#)).

Одной из важнейшей части является определение позиции каждого звена оси. Критерию точности предъявляется особые требования, исходя из технических требований, необходимо обеспечить точность 0.02 mm на расстоянии 350мм, для обеспечения данной точности необходимо, обеспечить минимальной угол поворота оси на 0.008185° . Разрешение абсолютного энкодера должно соответствовать не менее 16 бит, но энкодеры такого разрешения только начинают появляться и являются дорогим решением в данном применении. Так же стоит учитывать, для векторного регулирования необходимо определять положение ротора двигателя, для обеспечения плавного пуска двигателя. Наилучшим решением двух проблем является установка энкодера на ротор двигателя, а за счет редуктора вырастет не только момент, но и разрешающее способность угла поворота. Для обеспечения приемлемой точности необходимо использовать редуктор со степенью редукции не менее 11 при разрешении самого энкодера 12 бит. Только необходимо учитывать люфт во всех механических механизмах и устанавливать гармонические или циклоидальные безлюфтовые редукторы ([Sensinger & Lipsey 2012](#))

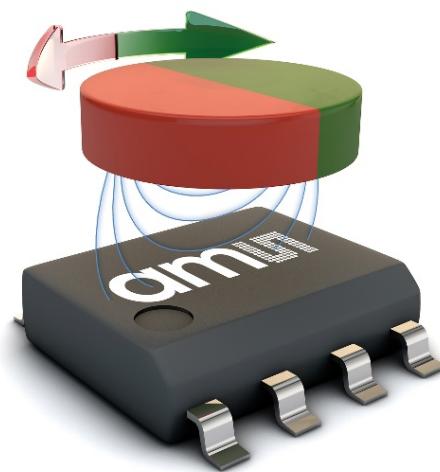


Рис. 3.2. Микросхема определения осевого положения AS5600

В качестве энкодера была выбрана микросхема AS5600 (Рис. 3.2) с цифровым выходом от фирмы «AMS». Датчик магнитного осевого положения AS5600 является бесконтактным датчиком определения абсолютного угла поворота, которая обеспечивает 12 битную точность в из-

мерении углов, в диапазоне от 0 до 360 градусов. AS5600 сочетает в себе надежность и простоту интеграции за счет использования цифрового интерфейса передачи данных I²C (Таблица 3.2), что делает его отличным выбором непрерывного и точного контроля за угловым положением оси мотора робота ([ams 2023](#)).

Таблица 3.2
Таблица параметров микросхемы осевого положения AS5600

Parameters	Value
Resolution [bit]	12
Output	Analog out / PWM / I ² C
Supply Voltage [V]	3-3,6
Temperature Range [°C]	-40 to +125
Package	SOIC-8
Max current [mA]	100
Sampling rate [μs]	150
Max RPM	20000
Position precision [°]	0.087

3.3. Устройство стратегического управления

Устройство стратегического управления необходимо для решения задач движения, а также является интерфейсом между устройством тактического управления и устройством интеллектуального уровня. Тем самым предоставляя контроль параметрами и управления самим роботом. Устройство стратегического управления должно соответствовать следующим требованиям:

- Выполнение нескольких задач одновременно (Многозадачность);
- Небольшой размер;
- Наличие GPIO;
- Высокая вычислительная мощность;
- Возможность использования библиотек и функций операционной системы;
- Малое напряжение питания;

- Поддержание технологий беспроводной связи, спецификации IEEE 802.11 или 802.15.

Эти требованиям отвечает одноплатный мини-компьютер «Raspberry Pi Zero W 2» (Рисунок 3.3) от компании «Raspberry Pi Foundation». Высокая вычислительная мощность платы (Таблица 3.3) и преимущества операционной системы «Linux» способствуют разработке и выполнению сложных алгоритмов и задач управления на самом устройстве. К тому же поддержка широкого спектра библиотек и доступу к 40-контактному разъему GPIO из операционной системы, значительно упрощает разработку сложных программ управления и интеграцию с другими системами. В отличии от предыдущих разработок «Raspberry Pi Zero», модификация «Pi Zero 2» имеет более производительный четырехядерный процессор «ARM Cortex-A53» и исправленный дизайн антенны для обеспечения лучшей беспроводной передачи информации.

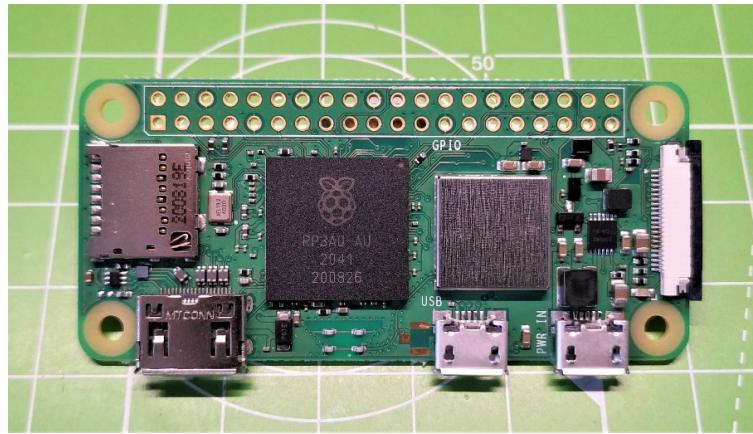


Рис. 3.3. Одноплатного мини-компьютер «Raspberry Pi Zero W 2»

Таблица 3.3

Таблица параметров одноплатного мини-компьютера Raspberry Pi Zero W 2

Parameters	Value
Processor	Broadcom BCM2710A1, Quad-core Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1GHz
RAM	512MB LPDDR2
Wireless Connectivity	802.11 b/g/n wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE
Ports	Mini HDMI, USB On-The-Go port, Micro USB power
GPIO Pins	40-pin GPIO header
Power Requirement	5V/2.5A DC via micro USB connector or GPIO
Size	65mm x 30mm x 5mm

Основываясь на требованиях к разрабатываемому устройству стратегического управления, с учетом его специфики работы, принято решение использовать операционную систему «Raspberry Pi OS Lite», которая основанная на дистрибутиве «Debian 12» 32-битной версии. Основной особенностью данного дистрибутива является стабильность, безопасность и широкая поддержка пакетов.

3.4. Контроллер тактического и исполнительного управления

Согласно требованиям к разрабатываемой системе управления, устройством управления для тактического и исполнительного устройства должно иметь малые габариты поэтому для реализации необходимо использовать микроконтроллер, за счет малых его размера. В задачу микроконтроллера входит: считывание и обработка данных от датчиков, осуществление обмена данными по шине данных, производство численных вычислений для векторного регулирования, прямой и обратной задачи кинематики, а также осуществление генерации сигналов PWM для инвертора. Минимальные требования к микроконтроллеру:

- Рабочее питание от 3В;
- Наличие более 20 линий ввода/вывода;
- Порты для работы с CAN-шиной;
- Порты для работы с PWM;
- Аппаратная поддержка I2C протокола на выводах МК;
- Наличие внутреннего АЦП;
- Наличие механизма прямого доступа к памяти DMA.

Основной проблемой при выборе микроконтроллера, был недостаток информации применительно к решению задач системы управления тактического и исполнительного управления. Проблема заключалась в выборе лучшей модели МК при решениях кинематических задач. Невозможно было определить какой МК, среди самых распространённых на рынке, имеет лидирующее место. Микроконтроллеры сильно отличаются внутри одного семейства, а при рассмотрении моделей от разных производителей, архитектура каждого МК сильно отличается, надо было учесть и (toolchain) набор инструментов программирования, который тоже мог влиять на производительность. Следовательно, возникла необходимость провести тестирование различных видов микроконтроллеров общего применения, доступных на рынке.

3.5. Тестирование микроконтроллеров

Проведённое тестирование было необходимо для нахождения подходящей модели микроконтроллера. Основным критерием выбора была скорость выполнения математических операций. Высокая скорость выполнения необходима для обеспечения эффективной работы системы в реальном времени. Это особенно важно в задаче векторного регулирования, где задержки в обработке данных приводят к существенным потерям точности, а также отзывчивости всей системы в целом. При более подробном рассмотрение задач связанных с вычислением задач кинематики и векторного регулирования, было обнаружено большое количество вычислений(Huang et al. 2011):

- Умножение и деление чисел с плавающей запятой;
- Вычисление тригонометрических выражений, функции синуса и косинуса;
- Вычисление квадратного корня.

Приведённые выше пункты являются сложными для вычислений на ядре микроконтроллера и нуждаются в большом количестве операций процессора для их вычисления. Вычисление подобных выражений будет занимать весомое количество времени, чем негативно скажется на быстродействии работы всего управления, так и на работе отдельных её частей(Pack & Barrett 2008).

Для проведения теста были выбраны микроконтроллеры от производителей: «STMicro electronics», «Raspberry PI Foundation», «Espressif Systems». Главным критерием сравнения было измерение затраченного времени на каждый тип вычисления. Во время тестирования не использовались действия, связанные с приостановкой главного цикла исполняемой программы, например прерывания.

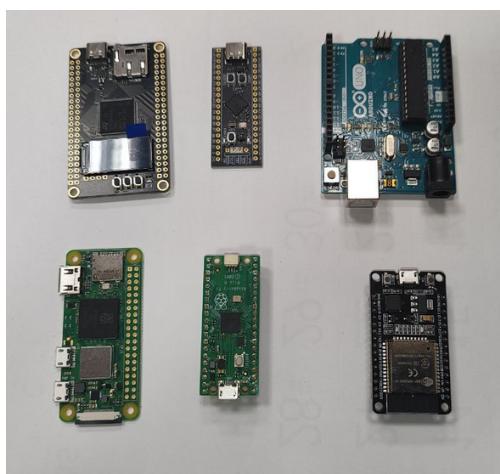


Рис. 3.4. Платы, который участвовали в тестировании

В таблице 3.4 приведен перечень использовавшихся микроконтроллеров, их тактовая частота и процессор. Платы которые участвовали в испытании изображены на рисунке 3.4.

Таблица 3.4
Список Микроконтроллеров и их характеристики

Board	MCU	Fcpu (Mhz)	CPU
Arduino Uno (original)	ATmega328p	16	AVR
NodeMCU-ESP32	ESP32	240	Dual Xtensa LX6
NodeMcu V3	ESP8266	160	Xtensa L106
Raspberry Pi Pico	RP2040 [Arduino IDE]	133	Dual Cortex M0+
Raspberry Pi Pico	RP2040 [C++ SDK]	133	Dual Cortex M0+
Raspberry Pi Pico	RP2040 [MicroPython]	133	Dual Cortex M0+
STM32 Nucleo-32	STM32G431KB	170	Cortex M4
STM32 Nucleo-32	STM32G431 [FPU-OFF]	133	Cortex M4, FPU-OFF

Суть программы в микроконтроллере состояла в вычислении затрачиваемого времени с использованием порта GPIO. Перед вычислением операции выключаются все прерывания, микроконтроллер поднимает сигнал на выводе в высокое состояние, производится вычисление математической операции, на выводе ножки МК опускает в нижнее состояние, прерывания восстанавливаются. Далее при помощи осциллографа НМО2024 от производителя «ROHDE & SCHWARZ», измерялась длительность импульса и данные записывались в таблицу 3.5, стоит отметить, что при расчётах учитывалось время переключения выходов GPIO, записанные во 2 колоне таблицы 3.5, результаты показаны на графике 3.5.

Таблица 3.5
Таблица измеренного времени на вычисление математических операций

MCU	Time IO [μs]	a + b [μs]	a - b [μs]	a * b [μs]	a / b [μs]	sin(a) [μs]	log(a) [μs]	sqrt(b) [μs]	pow(b, a) [μs]
ATmega328p	0,144	9,134	8,818	10,141	31,154	104,655	155,218	31,133	328,810
ESP32	0,312	0,402	0,389	0,399	0,567	0,798	1,357	0,691	3,120
ESP8266	0,508	0,942	0,959	1,214	2,296	13,393	26,611	8,454	76,808
RP2040 [Arduino IDE]	0,514	1,477	1,555	1,884	4,233	17,052	28,012	4,090	62,245
RP2040[C++ SDK]	0,008	0,750	0,783	0,650	0,819	4,634	6,610	0,709	17,288
RP2040 [MicroPython]	6,456	18,412	17,086	16,858	17,499	23,491	25,253	19,688	41,450
STM32G431	0,005	0,063	0,065	0,056	0,140	0,449	0,957	0,136	5,266
STM32G431 [FPU-OFF]	0,007	0,508	0,529	0,350	1,217	5,414	12,395	2,566	42,773

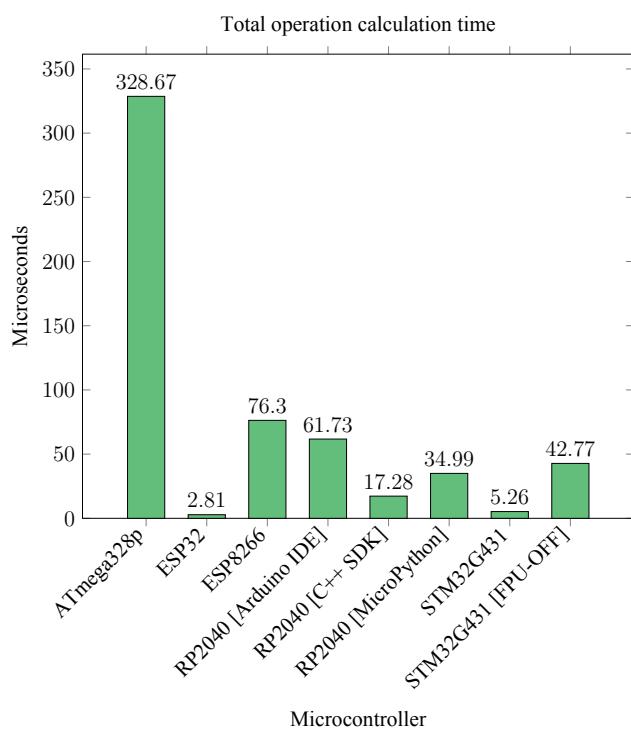


Рис. 3.5. График сравнения времени вычисления математических операций у различных МК

Приведённые данные не дали чёткую информацию о преимуществах конкретного контроллера в конкретных вычислениях, для давнейшего и более удобного анализа таблица пересчитана в значения тысяч операций в секунду kOPS, формула(1).

$$kOPS = \frac{1000}{T_{cal} - T_{io}} \quad (1)$$

Таблица 3.6

Таблица сравнения тысяч операций в секунду на вычисление математических операций у каждого МК

MCU	a + b	a - b	a * b	a / b	sin(a)	log(a)	sqrt(b)	pow(b, a)
ATmega328p	111,23	115,29	100,02	32,25	9,57	6,45	32,27	3,04
ESP32	11 090,82	12 961,74	11 549,13	3 918,10	2 056,26	956,62	2 641,39	356,12
ESP8266	2 305,87	2 217,75	1 416,38	559,44	77,61	38,31	125,85	13,11
RP2040 [Arduino IDE]	1 039,35	961,04	730,02	268,92	60,47	36,37	279,68	16,20
RP2040 [C++ SDK]	1 347,59	1 289,95	1 558,30	1 232,40	216,19	151,47	1 425,57	57,87
RP2040 [MicroPython]	83,64	94,07	96,13	90,56	58,70	53,20	75,57	28,58
STM32G431	17 179,17	16 702,61	19 476,01	7 383,89	2 253,15	1 050,29	7 624,36	190,09
STM32G431 [FPU-OFF]	1 996,11	1 918,50	2 917,02	826,69	184,94	80,73	390,85	23,38

Суммарные результаты пересчёта времени в значения тысяч операций в секунду (kOPS) представлены в таблице 3.6, на рисунке 3.6 изображён график максимальных значений тысяч операций в секунду для каждого микроконтроллера. В приведённых расчетах микроконтроллеры выполняли операции на максимум возможной тактовой частоте Fcpu , но у каждого МК максимальная тактовая частота разная (таблица 3.5), для оценки эффективности микроконтроллеров был проведёт расчёт количества тысяч операций в секунду на мегагерц(2). график приведён на рисунке 3.5, таблицу с расчётомами можно найти в приложении.

$$kOPS = \frac{K_{OPS}}{Mhz} \quad (2)$$

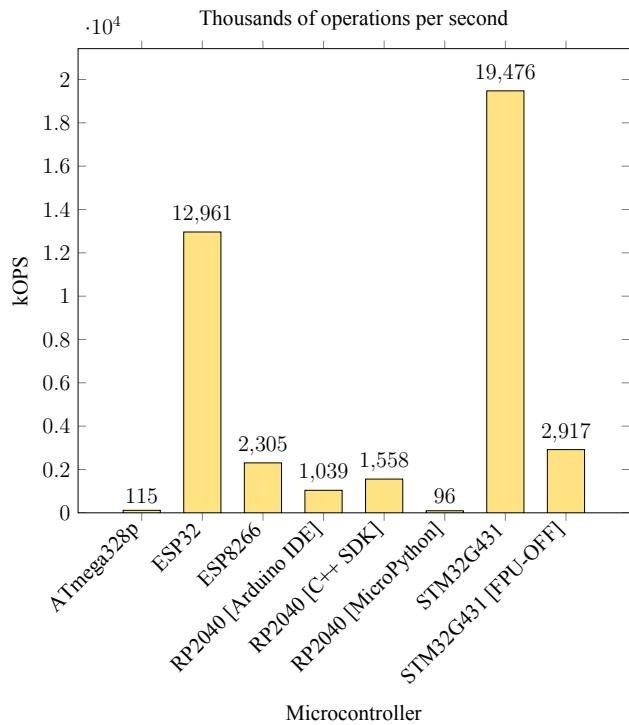


Рис. 3.6. График максимальных значений тысяч операций в секунду у различных МК

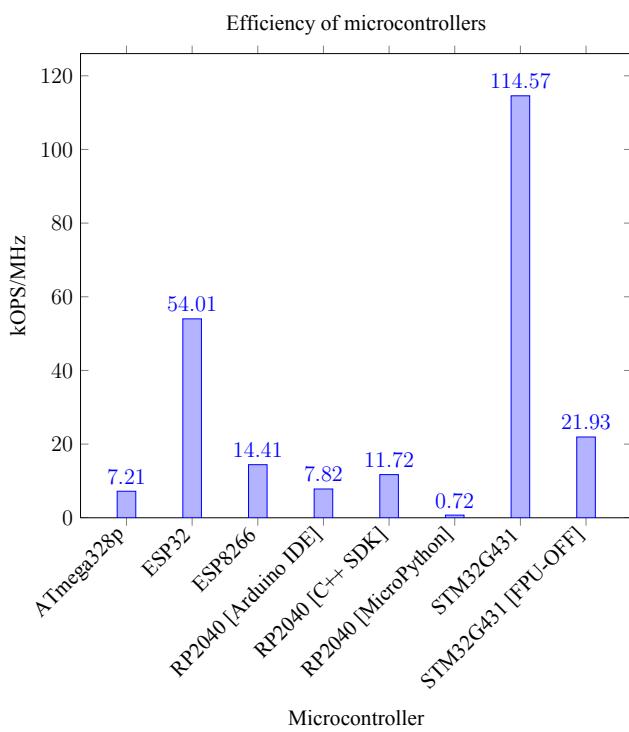


Рис. 3.7. График значений тысяч операций в секунду на 1 мегагерц каждого МК

В результате проведённых тестов было выяснено несколько интересных моментов связанных с микроконтроллерами. Как можно увидеть на рисунке 3.4 один процессор RP2040 с разными наборами средств разработки выдают различные результаты. Фаворитами теста являются МК ESP32 с процессором Dual Xtensa LX6 от китайской компании «Espressif Systems» и

микроконтроллер STM32G431 от компании «STMicroelectronics» с процессором Cortex M4. Чип STM был наиболее производительнее чем ESP32, хотя тактовая частота у ESP32 почти вдвое выше STM, но нет значительного прироста в математических операциях. Стоит учесть STM вышел в лидеры по времени, из-за наличия аппаратных блоков операций с плавающей запятой (FPU) в процессоре.

Таблица 3.7
Таблица основных характеристик микроконтроллера STM32G431

Parameter	Specification
Core	ARM Cortex-M4
Operating Frequency	Up to 170 MHz
Flash Memory	Up to 512 KB
RAM	Up to 128 KB
Digital I/Os	Up to 82
Timers	Multiple, including general purpose and advanced
DAC	Yes, up to 2 channels
ADC	Yes, up to 16-bit
Interfaces	I2C, SPI, UART, USB, and others
Operating Voltage	2.0 V to 3.6 V
Temperature Range	-40°C to +85°C
CAN Bus	Yes, CAN 2.0 (A, B)
Operational Amplifier (Op-amp)	Yes

А также сопроцессора аппаратного ускорения математических операций «CORDIC». В результате контроллером системы управления был выбран чип STM32G431, в таблице 3.7 представлены основные характеристики данного чипа ([STM 2023](#)).

3.6. Силовые ключи

Силовые транзисторные ключи формируют трехфазный инвертер, для управления электродвигателем. В данном случае транзисторные ключи задействованы для усиления PWM сигналов, поступающих от МК. Тип транзистора - N-канальный MOSFET транзисторы с индуцированным каналом. Такие транзисторы имеют очень малое сопротивление канала ($R_{ds(on)}$).

Это означает меньшие потери мощности при управлении нагрузкой, нагревание элемента будет меньше, что при одинаковых значениях параметров позволяет выбрать модели с меньшими габаритами. Силовые ключи должны соответствовать следующим требованиям:

- Рабочее выходное напряжение более 24В;
- Рабочий температурный диапазон -30 до +80;
- Тип транзистора – MOSFET;
- Тип канала – n;
- Маленький размер элемента;
- Тип установки – поверхностный монтаж.

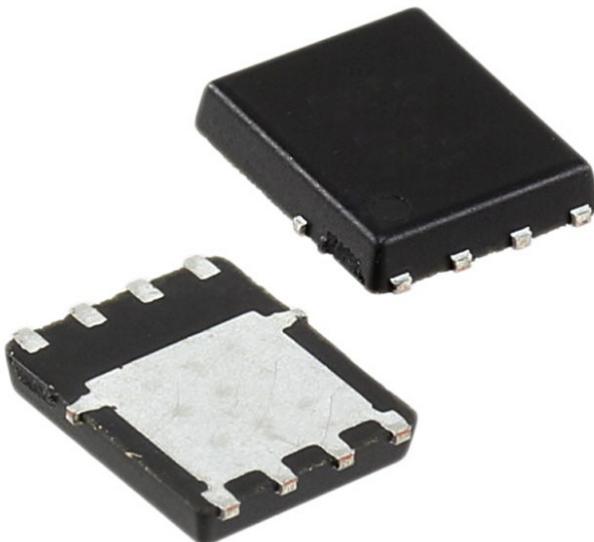


Рис. 3.8. Транзистор «SIR680DP»

Были выбраны транзисторы SIR680DP (Картинка 3.8) от «Vishay Siliconix», SIR680DP - n-канальный MOSFET мощностью 80В / 100А. Они обладают высокой плотностью тока и низким сопротивлением открытого канала ($R_{DS(on)}$), порядка 2.4 $m\Omega$, остальные параметры находятся в таблице 3.8, что стало идеальной характеристикой подходящего элемента для применения с использованием ширино-импульсной модуляции (PWM). Также важно отметить, что выбор компонентов был продиктован маленьким размером корпуса «PowerPAK-SO-8»,

Таблица 3.8

Таблица основных характеристик транзистор SIR680DP

Parameter	Specification
Type	N-Channel
Drain-Source Voltage (VDS)	80 V
Gate-Source Voltage (VGS)	± 20 V
Continuous Drain Current (ID)	100 A (at $T_C = 25$ °C)
Pulsed Drain Current (IDM)	200 A (for 100 μ s)
Power Dissipation (PD)	104 W (at $T_C = 25$ °C)
Operating Temperature Range	-55°C to +150°C
RDS(on) max. at VGS = 10 V	0.0024 Ω
Configuration	Single
Package	PowerPAK SO-8

3.7. Драйвер силовых ключей

Для облегчения управления мостовой транзисторной схемой инвертора используются драйвера. Их задача - преобразование маломощного сигнала, снимаемого с цифрового выхода МК, в сигнал с повышенным уровнем напряжения и мощности.

В данной реализации исполнительной систем использовались драйвера общего назначения L6385ED (Рисунок 3.9) производимые фирмой «STMicroelectronics». Данная микросхема является полумостовым драйвером. Один драйвер может управлять 2 силовыми транзисторами верхнего и нижнего уровня. Технические параметры L6385ED представлены в таблице 3.9.



Рис. 3.9. Драйвер L6385ED

Таблица основных характеристик драйвера L6385ED

Parameter	Specification
Maximum Operating Voltage	580V
Supply Voltage	$\pm 50\text{V/nsec}$ (across full temperature range)
Driver Current Capability (Sourcing)	400mA
Switching Time (rise/fall)	50/30 nsec
Level of Input Control Signals	CMOS/TTL Schmitt trigger with hysteresis and pull down
Under-voltage Lockout	On both lower and upper sections
Bootstrap Diode	Internal

3.8. Передатчик шины данных

Для обеспечения передачи данных между устройствами исполнительного управления, стратегического управления и других устройств целесообразно использовать шину данных, для уменьшения количества соединительных проводников. Наиболее подходящим протоколом передачи данных является CAN шина, который является промышленным стандартом промышленной сети и не однократно использовалась для внедрения в роботы манипуляторы ([Megalingam et al. 2021](#)). Главная причина использования шины CAN, это особенность в передачи данных, данные доступны всем устройствам, подключенным к сети. Возможна передача данных как одному, так и нескольким устройствам одновременно. На основе этого реализовывался вариант синхронизации всех исполнительных устройств, необходимых для своевременного начала движения ([stm 2020b](#)). На основе выбранной модели микроконтроллера в главе 3.5 и технических данных из таблицы 3.10, была выявлена аппаратная поддержка микроконтроллером CAN шины второго поколения - CAN FD.

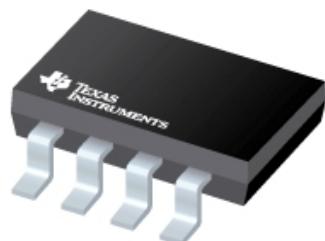


Рис. 3.10. Передатчик TCAN1462DRQ1

CAN-FD – это следующий этап развития классической шины CAN, которая обеспечивает более высокую скорость передачи данных и больший объем передаваемых данных в одном кадре, такое возможно из-за особенности передачи данных поля (CAN data) на скорости кратно превышающую скорость передачи заголовка, что может иметь значение вплоть до 8 Мбит/с.

Чтобы не ограничивать в возможной скорости передачу данных по шине CAN, был выбран передатчик TCAN1462DRQ1 (изображен на рисунке 3.10), передатчик выполняет усиление сигналов, защиту линии в случае повреждения CAN-шины, и регулировку скорости их передачи.

Таблица 3.10
Таблица основных характеристик передатчика TCAN1462DRQ1

Parameter	Specification
Package	SON-8 (3x3mm)
Operating Temperature Range	-40°C to +125°C
Supply Voltage Range	4.5V to 5.5V
Standby Current	Typically 5µA
Data Rate	Up to 5 Mbps
ISO 11898-2 Compliance	Yes

3.9. Преобразователь питания

Из-за высокого потребления мини-компьютера, потребления достигает до 2.5А. По рекомендации производителя необходимо использовать отдельный DC – DC преобразователь. Источник питания должен соответствовать следующим требованиям:

- Входное напряжение 24В;
- Преобразование DC-DC;
- Выходное напряжение 5В;
- Высокий выходной ток 3А и более.

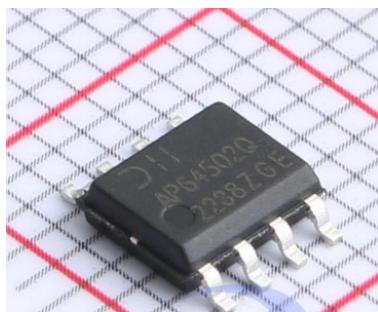


Рис. 3.11. DC – DC микросхема AP64502QSP

Была выбрана микросхема DC-DC Step-down преобразователя AP64502QSP, показанная на рис. 3.11. Преимущество импульсного преобразователя в высокой эффективности, не требующей теплоотвода, позволяет создавать компактные решения преобразования напряжения и тока. Основным преимуществом выбора является способность преобразования большого тока 5А (таблица 3.11), без использования внешних ключей и меньшего количества необходимых для работы данной микросхемы элементов ([DIODES 2021](#)).

Таблица 3.11
Таблица основных характеристик DC-DC преобразователя AP64502QSP

Parameter	Specification
Input Voltage Range (VIN)	3.8V to 40V
Continuous Output Current	5A
Programmable Switching Frequency	100kHz to 2.2MHz
Efficiency at Light Load	Up to 85%
Gate Driver Design	Proprietary, for EMI Reduction
Frequency Spread Spectrum (FSS)	Yes, for EMI Reduction
Low-Dropout (LDO) Mode	Yes
Precision Enable Threshold	For UVLO Adjustment
Protection Features	UVLO, OVP, Peak Current Limit, Thermal Shutdown

3.10. Функциональная схема системы управления мини роботом

Функциональная схема системы управления мини роботом манипулятором показана на рис. 3.12. Главным управляющим элементом системы тактического управления, является управляющий МК STM32G431. К данному микроконтроллеру подключены все необходимые элементы.

Подключение Raspberry Pi Zero W2 (в роли стратегического устройства) к главному управляющему элементу STM32G431 возможно через два интерфейса UART, передача информации в текстовом виде и через SPI, для передачи сериализованных данных больших объёмов на большей скорости. Устройство Raspberry Pi задействует 5 линий ввода/вывода:

- PA7 (SPI1_MOSI) → GPIO 12 (RPI_MOSI);
- PA6 (SPI1_MISO) → GPIO 13 (RPI_MISO);
- PA5 (SPI1_SCLK) → GPIO 14 (RPI_SCLK);
- PA3 (UART2_RX) → RPI (RPI_TX);
- PA2 (UART2_TX) → RPI (RPI_RX).

Осуществление общения между устройствами исполнительной системы, используется передатчик шины CAN (TCAN1462) и передатчик задействует 2 линии ввода/вывода порта B, микроконтроллера STN32G431:

- PB9 (FDCAN_TX) → CAN Transceiver (CAN_TX);
- PB8 (FDCAN_RX) → CAN Transceiver (CAN_RX);

Для обеспечения внешней связи используется передатчик интерфейса RS485 который подключается к 2 линии ввода/вывода порта A.

- PA10 (UART2_TX) → RS485 (UART_TX);
- PA9 (UART2_RX) → RS485 (UART_RX);

Индикация состояния робота происходит через панель индикации и состоит из трёх светодиодов разного цвета и занимает 3 линии ввода/вывода порта B.

- PB0 ← Indication Panel (LED_YEL);
- PB1 ← Indication Panel (LED_RED);
- PB2 ← Indication Panel (LED_GRN);

Остальные свободные линии ввода/вывода портов B, отведены на блоки цифровых входов и выходов:

- **Цифровые входы:**

- PB11 ←DI (IN_1);
- PB12 ←DI (IN_2);
- PB13 ←DI (IN_3);
- PB14 ←DI (IN_4);
- PB15 ←DI (IN_5);
- PA8 ←DI (IN_6);

- **Цифровые выходы STN32G431:**

 - PB7 →DO (OUT_1);
 - PB6 →DO (OUT_2);
 - PB5 →DO (OUT_3);
 - PB4 →DO (OUT_4);
 - PB3 →DO (OUT_5);
 - PA15 →DO (OUT_6);

Подключение всех частей системы производится на электронной плате с помощью пайки элементов. Также будут применены следующие разъёмы:

- разъёмы для рабочего напряжения – XT30;
- Разъёмы для шины CAN - JST 1.25 PH 2;
- Штыревые разъёмы для остальной периферии - PBS.

Разъёмы XT30 обеспечивают надежное соединение и выдерживают значительные электрические нагрузки без потерь и риска возгорания из-за плохого контакта или перегрева.

Разъемы JST обеспечивают простоту подключения и отключения, что удобно при обслуживании и модернизации системы. Они предотвращают случайное обратное подключение, что может быть критично для предотвращения повреждений компонентов при монтаже.

Штыревые разъемы PBS подходят для подключения компонентов не требующих высоких токов, и при этом могут многократно использованы. Штыревые разъемы обеспечивают хороший контакт и простоту монтажа на печатной плате, что важно для быстрого прототипирования и наладки системы.

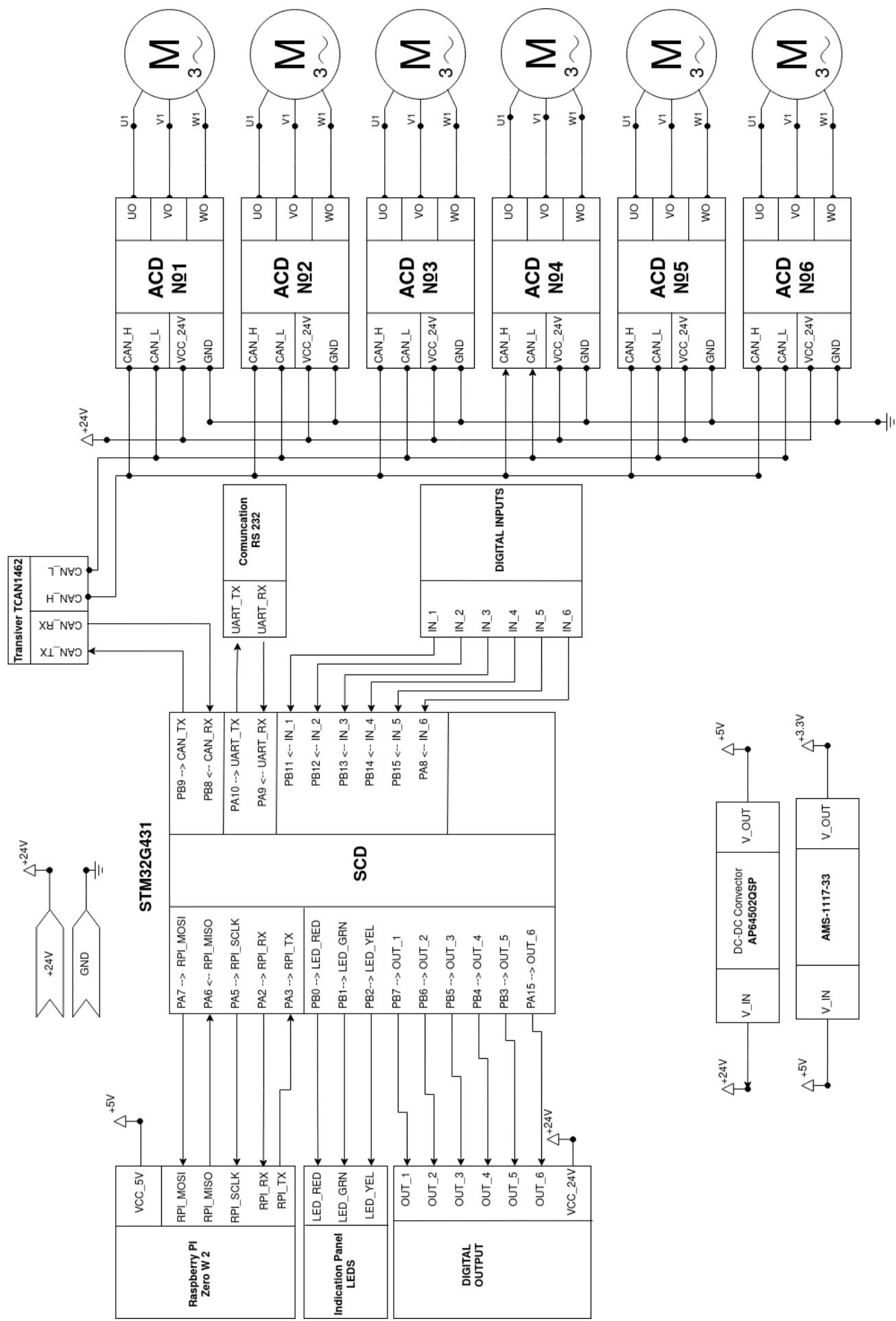


Рис. 3.12. Функциональная схема системы управления мини роботом

3.11. Разработка функциональной схемы системы исполнительного устройства

Функциональная схема показана на рисунке 3.13/

Главным управляющим элементом обработки команд и генерации сигналов, системы исполнительной управления, является МК STM32G431. Генерация сигналов PWM происходит таймером и выводятся 6 каналами сравнения, которые выведены на линии порта А, С и В:

- PB15 → HIN1;
- PB10 → LIN1;
- PA12 → HIN2;
- PB9 → LIN2;
- PC13 → HIN3;
- PA8 → LIN3;

Драйвера усиливают сигнал от МК и подают на силовые ключевые транзисторы:

- HIN1 → HGV1;
- LIN1 → LGV1;
- HIN2 → HGV2;
- LIN2 → LGV2;
- HIN3 → HGV3;
- LIN3 → LGV3;

Для измерения момента приложенного на двигатель, происходит измерения милы тока на каждой обмотке двигателя, измеряется падение напряжения путем подачи сигналов на входы операционных усилителей, которые встроенные в микроконтроллер 6 входов подключение производится:

- PA1 ← +VSHUNT_1;
- PA3 ← -VSHUNT_1;
- PA7 ← -VSHUNT_2;

- PA5 \leftarrow +VSHUNT_2;
- PB0 \leftarrow -VSHUNT_3;
- PB2 \leftarrow +VSHUNT_3;

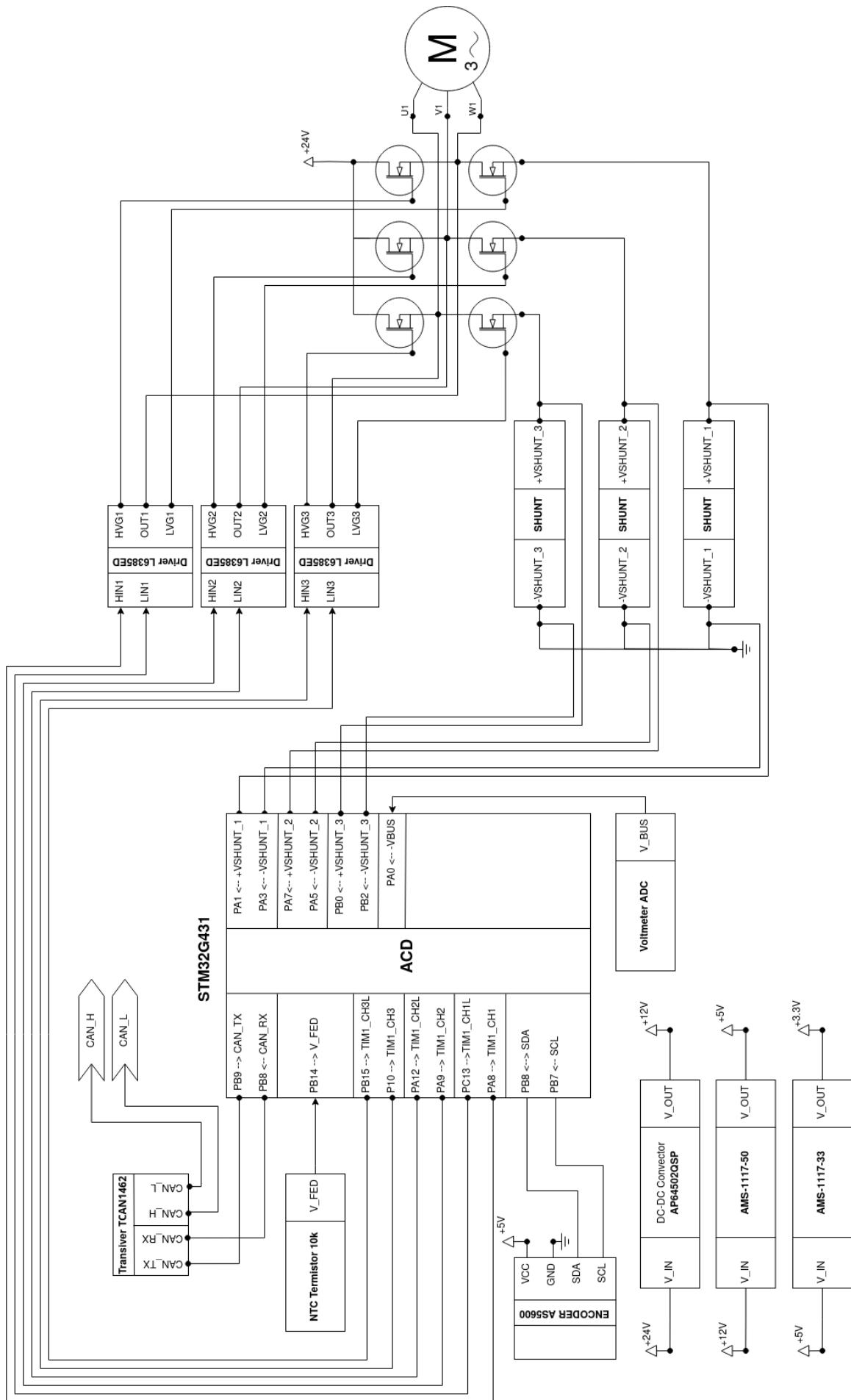


Рис. 3.13. Функциональная схема системы исполнительного управления

Во избежание поломки устройства, предусмотрены две линии порта входа для подключения к АЦП микроконтроллера, один необходим для измерения температуры, датчик будет находится рядом с силовыми транзисторами, таким образом в случае перегрева, микроконтроллер предпринимает действия по установке в состояние ошибки. Второй АЦП используется для измерения поступающего рабочего напряжения, в случае выхода из диапазона рабочего напряжения, МК переходит в режим ошибки. АЦП расположены на линиях порта A и подключаются:

- PA5 → V_FED;
- PA0 → V_BUS;

4 ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА

4.1. Принципиальная схема устройства исполнительного управления

Принципиальная схема устройства исполнительного управления мини робота манипулятора представлена на рисунке 4.1. Микроконтроллер U9 является главным вычислительным компонентом исполнительной системы управления. Чип STM32G431CBU6 подключен по стандартной схеме, из даташита ([STM 2020a](#))DC-DC преобразователь является главным источником питания для всего устройства исполнительного управления, а микроконтроллер работает с аналоговым сигналом. Для повышения стабильности работы аналоговых операционных усилителей и точности работы АЦП в схеме реализован фильтр подавления шумов на линии аналогового питания VDDA и линии опорного напряжения VREF+, который собран по заметкам AN5346 (STM, 2019). Микроконтроллер тактируется при помощи кварцевого резонатора X1 и X2, которые подключены по стандартной схеме с конденсаторами C23, C24 для X1 и C18,C19 для квадратного резонатора X2. Кварцевый резонатор X1 является главным генератором тактирующего HSE сигнала 8 МГц для микроконтроллера U9. Кварцевый резонатор X2 имеет специфичную низкоскоростную частоту LSE 32.768kHz, резонатор необходим для работы часов реального времени RTC, часы используются для точного отсчета времени без накопления ошибки в случае двоичного преобразования. Для программирования микроконтроллера выводы программатора-отладчика выведены на разъем H2.

Для контроля состояния исполнительного устройства предусмотрены два светодиода LED1 и LED2. Светодиод LED1 подключен через токовый резистор к питанию и загорается при поступлении питания, LED2 загорается при необходимости от сигнала МК и является индикатором ошибки работы исполняющего устройства. К входу АЦП PA0 микроконтроллера подключен делитель входного напряжения, состоящий из резисторов R16 и R18, номиналы сопротивления выбраны более 10 kOhm для предотвращения большого падения напряжения на резисторах, максимальное возможное измеряемое напряжение 33 Вольта. Второй вход АЦП PB14 подключен к выводам схемы измерения температуры, которая состоит из NTC резистора R15 и балансного сопротивления R20, конденсатор C30 является элементом фильтра низкой чистоты, верхняя граничная частота 1.5 kHz.

Драйвера инвертора U7, U8, U10 подключены к выходу таймера TIM1, которые располагаются на линиях порта A и C, для подавления высокочастотных наводок, каждому из входов подключены емкости C21, C22, C26, C27, C32, C33 номиналом 100 пикофарад. Конденсаторы

ры С20, С25, С31 на линии питания установлены, для предотвращения резкого падения напряжений при открытии внутренних силовых транзисторов. Диоды D1, D3, D4 образуют схему начальной нагрузки, необходимы для обеспечения питания высоковольтной секции драйвера. Драйверы управляют силовыми транзисторами от Q1 - Q6, полумостовой драйвер управляет транзисторами верхней и нижнего уровня для каждой фазы мотора. Транзисторы подключены через низкоомные резисторы R9, R11, R13, R17, R21, R25 для исключения звона (parasitic oscillation) и резисторами R8, R10, R12, R14, R19, R22, резисторы подтягивают затвор к истоку, для избежания паразитных открытий транзисторов.

Для обеспечения связи по шине данных, линии МК PB9 и PA11 подключены к передатчику CAN ШИНЫ U4. Передатчик не нуждается в дежурном режиме, поэтому вывод STB (восьмой вывод микросхемы) подключен к земле, передатчик работает с момента включения. Между линиями CANH и CANL предусмотрено включение терминального резистора R7, через перемычку H3. Для удобства монтажа устройств исполнительного управления коннекторы JP2 и JP1 образуют параллельное включение двух разъемов позволяет производить подключений устройств без создания дополнительных соединений на проводах. По такому же принципу подключены силовые разъемы питания CN1 и CN2.

В данном устройстве реализовано несколько вариантов преобразования напряжений и тока. Основным преобразователем является микросхема DC-DC преобразователя AP64502QSP, которая подключена по стандартной схеме из даташита.

Микросхема преобразует входное напряжение в напряжение 12В, которое необходимое для питания драйверов силовых транзисторов. Для обеспечения преобразования напряжения необходимо было рассчитать делитель обратной связи на вход линии FB (Feedback), который вычисляется (3):

$$R4 = R6 \cdot \left(\frac{V_{out}}{0.8V} - 1 \right) \quad (3)$$

где R2=10 kOhm, для данного варианта значения получились R1=140 kOhm. Конденсатор C6 на линии SS DC-DC преобразователя является задающим времени мягкого старта. Был выбран стандартный вариант 10nF, чему примерно.

равен временя мягкого старта - 4 ms. Индуктивность катушки рассчитывается для данного преобразователя по формуле (4), где ΔI_l при данном подключении рассчитывается по формуле (5);

$$L = \frac{V_{out} \cdot (V_{in} - V_{out})}{V_{in} \cdot \Delta I_l \cdot f_{sw}} \quad (4)$$

$$\Delta I_l = 0.5 \cdot 5A \quad (5)$$

Микросхема имеет плавную регулировку частоты от 100kHz до 2.2MHz, частота задается резистором R5, частота рассчитывается по формуле (R5):

$$R5 = \frac{100000}{f_{sw}[kHz]} \quad (6)$$

Для варианта преобразования выбран самый близкий по параметрам индуктивность L = 10 мН. В стандартную схему преобразователя внесен дополнительный ряд сглаживающих tantalовых конденсаторов C8, C9, C10, C14, C17. Танталовые конденсаторы имеют маленькое значение внутреннего сопротивления (ESR), который влияет на выходные пульсации (7):

$$V_{outRipple} = \Delta I_l \cdot (ESR + \frac{1}{8 \cdot f_{sw} \cdot C_{cout}}) \quad (7)$$

суммарная емкость конденсаторов $5 \times 47\mu F$.

Для преобразования напряжения для микроконтроллеров используются линейные преобразователи напряжения U3 и U5, линейные преобразователи подключены к линии питания 12В для уменьшения нагрева самих преобразователей, путем уменьшения падения напряжения на них.

Измерение крутящего момента производится за счет измерения тока электродвигателя. Измеряется падения напряжения на шунтах, шунты R1, R2 и R3 имеют очень малое сопротивление, во избежания влияния передаваемое напряжения и излишнего нагрева. Выводы шунтов подключены ко входам микроконтроллера. После конфигурации микроконтроллера, с линий входа шунтов подключаются ко внутренним операционным усилителям и используются в дальнейших преобразования.

4.2. Принципиальная схема устройства тактического управления

Принципиальная схема системы тактического управления устройства мини робота манипулятора представлена на рисунке 4.2.

Микроконтроллер U15 является устройством тактического управления и собран по стандартной схеме, как на рисунке 4.1. Устройство стратегического управления подключается через разъём J1 и используют два варианта интерфейса SPI и UART. Остальные выводы разъёма J1 не используются, так как к ним могут подключаться различные платы расширения для «Raspberry PI ZERO 2», который расширяют функционал одноплатного миникомпьютера.

анель индикации состоит из трех светодиодов 3 цветов LED4, LED5, LED6 и подключены

ко входу МК. Остальные свободные входы и выходы МК разделены для управления внешних сигналы входов (6 штук) и выходов (6 штук) и подключены по стандартной схеме из даташита.

Входы и выходы изолированы при помощи оптопар, выходные сигналы коммутируются при помощи реле K1, K2, K3, K4, K5, K6, сигналы с оптопар U16, U19, U22, U25, U28, U31 усиливаются транзисторами U18, U21, U24, U27, U30, U30. Резистор в цепи базы необходим для ограничения тока поступающего на базу транзистора. Диоды D5, D6, D7, D8, D9, D10 необходимы для шунтирования выводов катушки реле в момент отключения питания. В момент выключения, на выводах катушек образуется импульс ЭДС (электродвижущая сила самоиндукции катушки), и этот импульс может достигать десятки Вольт и может привести к выходу из строя транзисторов U18, U21, U24, U27, U30, U30, которые не рассчитан на такое напряжение.

Входные цифровые сигналы изолируются с помощью U17, U20, U23, U26, U29, U32. Подразумеваются логическая «1» соответствует 24В напряжения. Для обеспечения включения оптопары произведен расчет резисторов R35, R40, R45, R50, R60, с условием, ток на оптодиод должен соответствовать 20 mA, при напряжении 1.2 Вольта, допустимое максимальное напряжение 30 Вольт, приближенное значение сопротивления резистора, выбранно из ряда E24 и соответствует 1.5 kOhm.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akcayir, Y. & Ozkazanc, Y. (2003), Gyroscope drift estimation analysis in land navigation systems, in ‘Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003. CCA 2003.’, Vol. 2, pp. 1488–1491 vol.2.
2. Altan, A. & Hacıoğlu, R. (2020), ‘Model predictive control of three-axis gimbal system mounted on uav for real-time target tracking under external disturbances’, *Mechanical Systems and Signal Processing* **138**, 106548.
URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106548>
3. ams (2023), ‘ams.com’, https://ams.com/documents/20143/36005/AS5600_DS000365_5-00.pdf/649ee61c-8f9a-20df-9e10-43173a3eb323. [Accessed 31-01-2024].
4. Bélanger-Barrette, M. (n.d.), ‘What Does Collaborative Robot Mean ? — blog.robotiq.com’, <https://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean>. [Accessed 01-02-2024].
5. DIODES (2021), ‘Datasheet AP64502Q’, https://lv.mouser.com/datasheet/2/115/DIOD_S_A0011818538_1-2543578.pdf. [Accessed 31-01-2024].
6. Huang, G.-S., Tung, C.-K., Lin, H.-C. & Hsiao, S.-H. (2011), Inverse kinematics analysis trajectory planning for a robot arm, in ‘2011 8th Asian Control Conference (ASCC)’, pp. 965–970.
7. Khatib, O., Quinlan, S. & Williams, D. (1997), ‘Robot planning and control’, *Robotics and Autonomous Systems* **21**(3), 249–261.
URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8890\(96\)00078-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8890(96)00078-4)
8. Li, J., Guan, Y., Chen, H., Wang, B., Zhang, T., Hong, J. & Wang, D. (2022), ‘Real-time normal contact force control for robotic surface processing of workpieces without a priori geometric model’, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **119**(3–4), 2537–2551.
URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-021-07497-2>
9. Megalingam, R. K., Sahajan, A., Rajendraprasad, A., Manoharan, S. K. & Reddy, C. P. K. (2021), Ros based six-dof robotic arm control through can bus interface, in ‘2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)’, IEEE.
URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ICICCS51141.2021.9432341>

10. Pack, D. & Barrett, S. (2008), *Microcontroller Theory and Applications: HC12 and S12*, Pearson Prentice Hall.
URL: <https://books.google.lv/books?id=klZUPxiGUJ4C>
11. Sakama, S., Tanaka, Y. & Kamimura, A. (2022), ‘Characteristics of hydraulic and electric servo motors’, *Actuators* **11**(1), 11.
URL: <http://dx.doi.org/10.3390/act11010011>
12. sciencedirect (2023), ‘Robust design of independent joint control of industrial robots with secondary encoders — sciencedirect.com’. [Accessed 31-01-2024].
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584521001149>
13. Sensinger, J. W. & Lipsey, J. H. (2012), Cycloid vs. harmonic drives for use in high ratio, single stage robotic transmissions, in ‘2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation’, IEEE.
URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224739>
14. simplefoc (2023), ‘BLDC motors’, https://docs.simplefoc.com/bldc_motors. [Accessed 31-01-2024].
15. STM (2020a), ‘Datasheet STM32G431’, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g431rb.pdf>. [Accessed 31-01-2024].
16. stm (2020b), ‘FDCAN peripherals for STM32 product’, https://www.st.com/resource/en/application_note/an5348-introduction-to-fdcan-peripherals-for-stm32-product-classes-stmicroelectronics.pdf. [Accessed 31-01-2024].
17. STM (2023), ‘How to use the CORDIC to perform mathematical functions on STM32 MCUs’, https://www.st.com/resource/en/application_note/an5325-how-to-use-the-cordic-to-perform-mathematical-functions-on-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf. [Accessed 31-01-2024].