

Содержание

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ . .	9
1.1. Электрические машины от Gimbal	9
1.2. Особенности мини роботов манипуляторов	10
1.3. Общие требования к система управления робота манипулятора	13
1.4. Система управления Gimbal в роли системы управления роботом	13
1.5. Определение функций и технических характеристик системы управления для мини роботом	14
2 СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА . .	17
2.1. Особенность иерархической структуры	17
2.2. Структурная схема системы управления мини робота	18
2.3. Структурная схема системы исполнительного управления	20
2.4. Алгоритм работы устройства тактического управления	22
2.5. Алгоритм работы устройства исполнительного управления	25
3 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА	28
REFERENCE LIST	29

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

ВВП – 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 промышленных 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. Электрические машины от Gimbal

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[ссылка]. Устройство группы Gimbal изображенно на картинке 1.1 и представляет собой сложную систему взаимодействия электродвигателей, электроники и датчиков для обеспечения плавности и стабилизации камер. В большинстве случаев данные устройства используются людьми, поэтому уделяются особое внимание компактности и малому весу.



Рис. 1.1. Устройство Gimbal

Главной особенностью является использование бесколлекторных электрических двигателей постоянного тока, известные также как BLDC (Brushless DC) моторы. BLDC моторы обладают высокой эффективностью и мощностью при небольшом весе. К примеру, стабилизатор камер «RONIN» от компании «DJI», можно считать популярными и доступным товаром на рынке. В его спецификации производитель заявляет максимальный вес до 7.25кг, при весе устройства (без груза) 4.2 кг, то есть нагрузка превышает почти в более чем два собственный вес устройства (Ronin 2023).

Данный пример не исключение, производители предлагают обширное количество моде-

лей подобных устройств с различными характеристиками. Из-за высокого спроса на устройства данной категории, производители начали выпускать BLDC двигатели с оптимизированными параметрами электронных стабилизаторов. В интернете и литературе начали использовать термин Gimbal motors ([Lee et al. 2018](#)), то есть двигатели с конкретными характеристиками и под конкретные задачи.

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

1.2. Особенности мини роботов манипуляторов

В настоящее время роботы манипуляторы являются главным элементом процесса автоматизации производств. Обуславливается это гибкостью, точностью, скоростью и способностью выполнять поставленные задачи. Роботы способны работать автономно круглосуточно, что способствует повышению количества производимых товаров. Роботы все больше используются для выполнения опасных, вредных и монотонных задач, облегчая условия труда для человека. 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 промышленных роботов является не эффективным и не рациональным решением, виду их большого размера и параметров несоответствующих для работы с мелкими деталями и конструкциями.

Целесообразно использовать для задач подбора и размещения, сборки, дозирования, тестирования и контроля мелких деталей роботов меньших габаритов то есть мини роботов. Мини роботы манипуляторы существуют 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 не является новой, однако стоит отметить, количество информации, на данный момент, о роботах этого класса крайне не большое. В случае использования данных роботов в промышленном производстве в области работ с мелкими деталями, большинство задач требующих ручного труда человека, будут автоматизированы (робототизированны).



Рис. 1.2. Meca500 Robot Arm

На данный момент лидером в сфере промышленного производства является Китай, на промышленность которого приходится 32% ВВП (? , statistaChinaComposition) Именно в Китае массовое производство является очень развитым. Главным фактором, обуславливающим это можно назвать то, что в КНР крайне дешевая рабочая сила (Рисунок 1.2).



Рис. 1.3. Процесс работы людей в Китае в сфере производства

Однако, за этим притягательным для многих, в том числе европейских, компаний фактором часто скрываются негуманные условия работы, детский труд и необеспечение безопасной рабочей среды. В свою очередь развитие мини роботов не только создаст почву для открытия промышленных производств в Евро Союзе, что в свою очередь уменьшит затраты на транспортировку и освободит от многих налогов, но и поможет предотвратить использование «грязной» рабочей силы.

Экономическая выгода для бизнеса от применения мини роботов большая, так как мини роботы способны заменить значимую часть человеческого ручного труда. Это в свою очередь создает благополучную почву для увеличения количества производимого товара, исключает большую часть возможных производственных ошибок, вызванных человеческим фактором.

Замена рабочей силы может стать фактором для увеличения чистой прибыли компаний даже в Латвии, так как исключается необходимость в выплате обязательных взносов на национальное социальное страхование (MSSIC) размер которой составляет от 23,59 до 34,09 процентов ежемесячно. Соответственно при уменьшении количества работников компания получит более высокий доход, ведь не будет необходимости платить суммарный налог MSSIC (Vid 2023).

Дальнейшее развитие мини роботов возможно только путем улучшения 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 1.4 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.

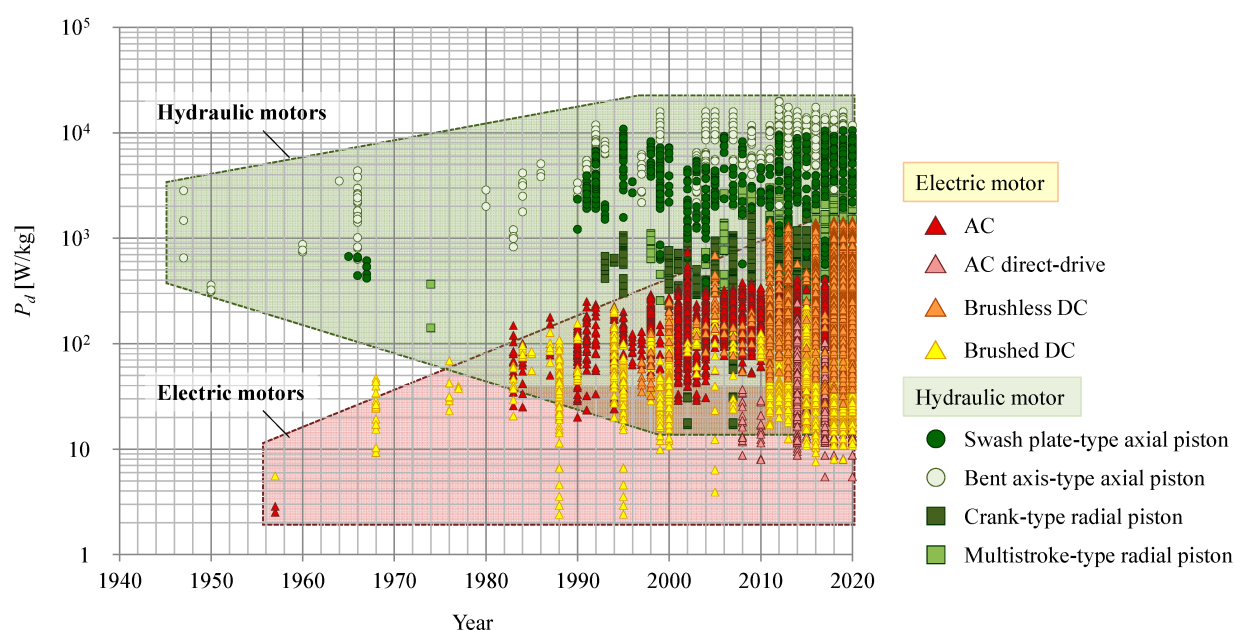


Рис. 1.4. Измерение удельной мощности в электрических двигателях во времени (Sakama et al. 2022)

1.3. Общие требования к система 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 являться 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 то же время области применения двух систем диаметрально отличаются друг от друга: в системах управлениях Gimbal не применяются датчики угла поворота оси двигателя, а информацию о значении текущего положения 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 (Akçayir & Ozkazanc 2003). Можно использовать алгоритмы

фильтрации данных для уменьшения погрешностей управления, но это усложняет систему управления. Привлекательно является применение более простых и надёжных решения управления.

Если нет возможности использования систему 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 бесщёточных 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, следуя 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 1.5.

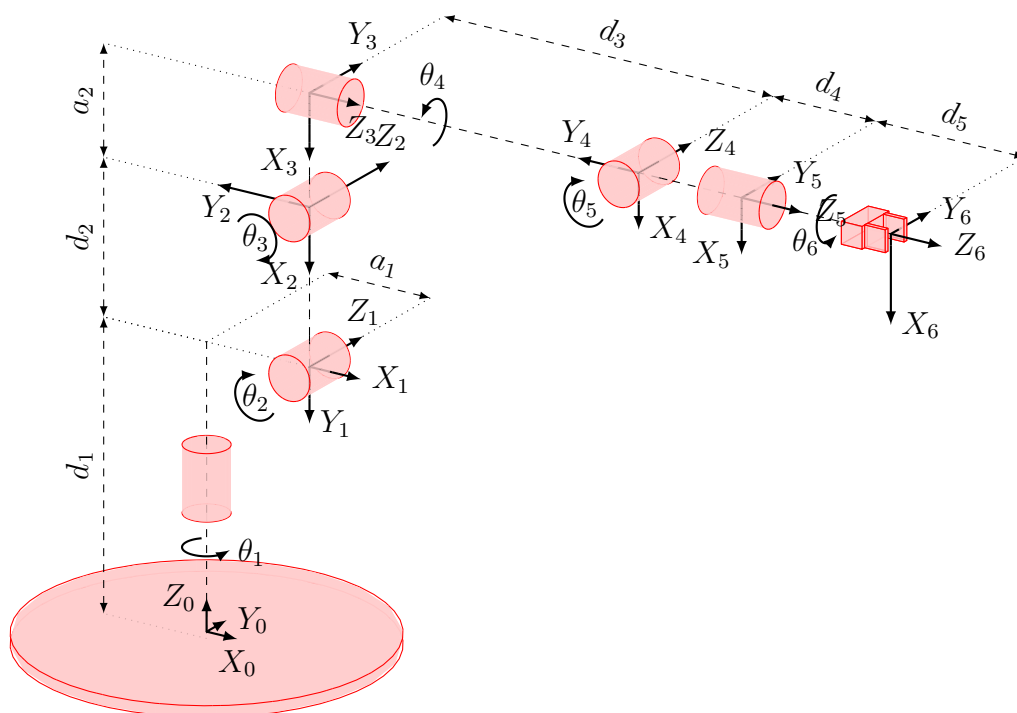


Рис. 1.5. Кинематическая структура мини робота

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 °/s;
- 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.

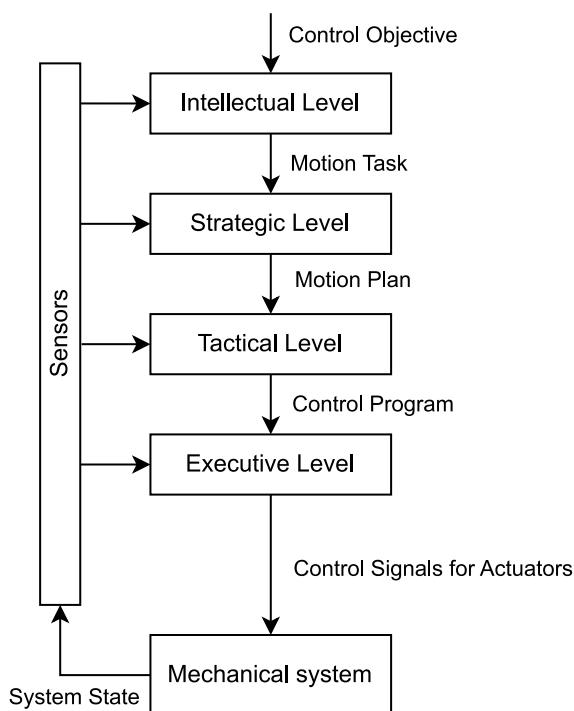


Рис. 2.1. Иерархическая архитектура системы управления роботом

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.

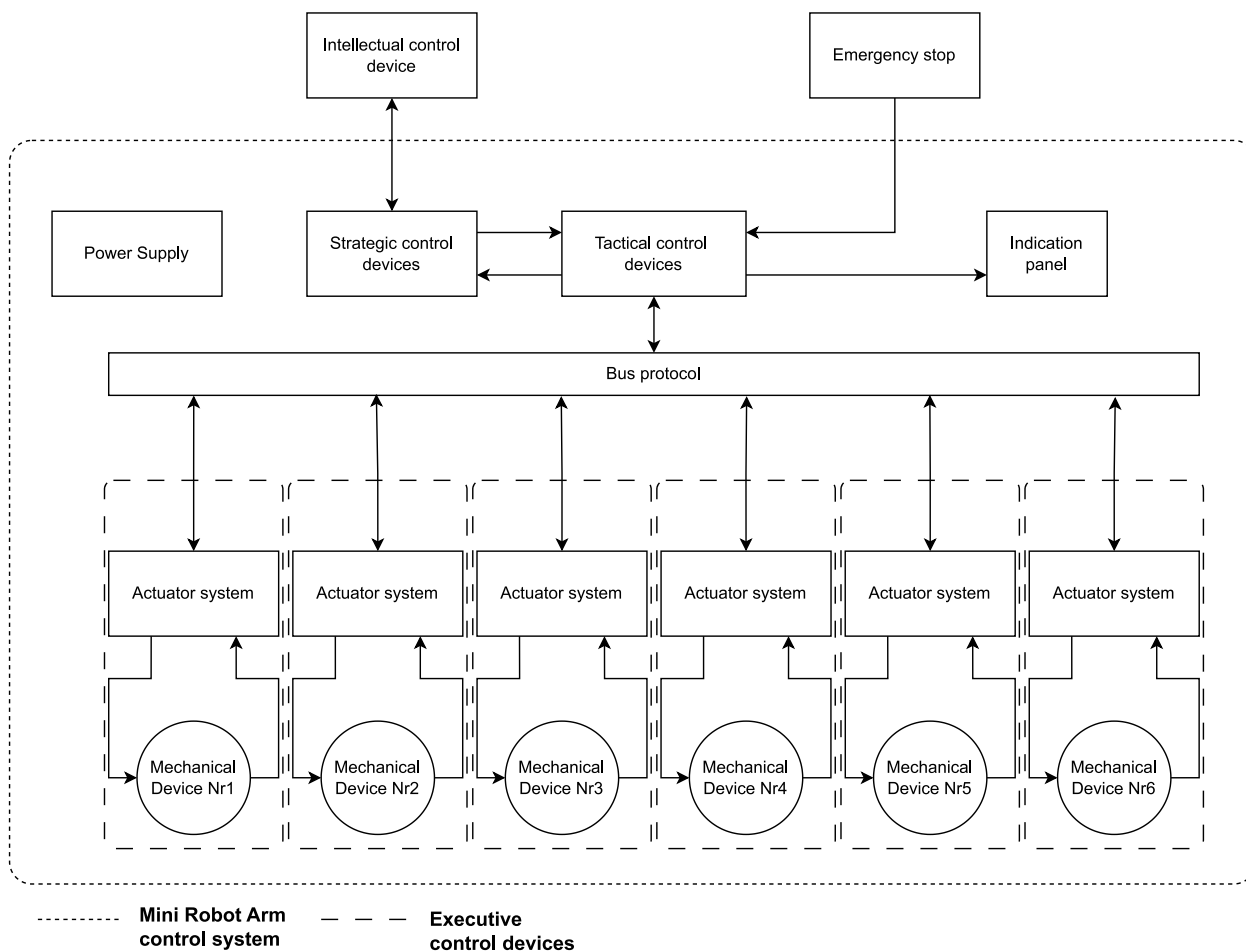


Рис. 2.2. Структурная схема системы управления мини робота

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.

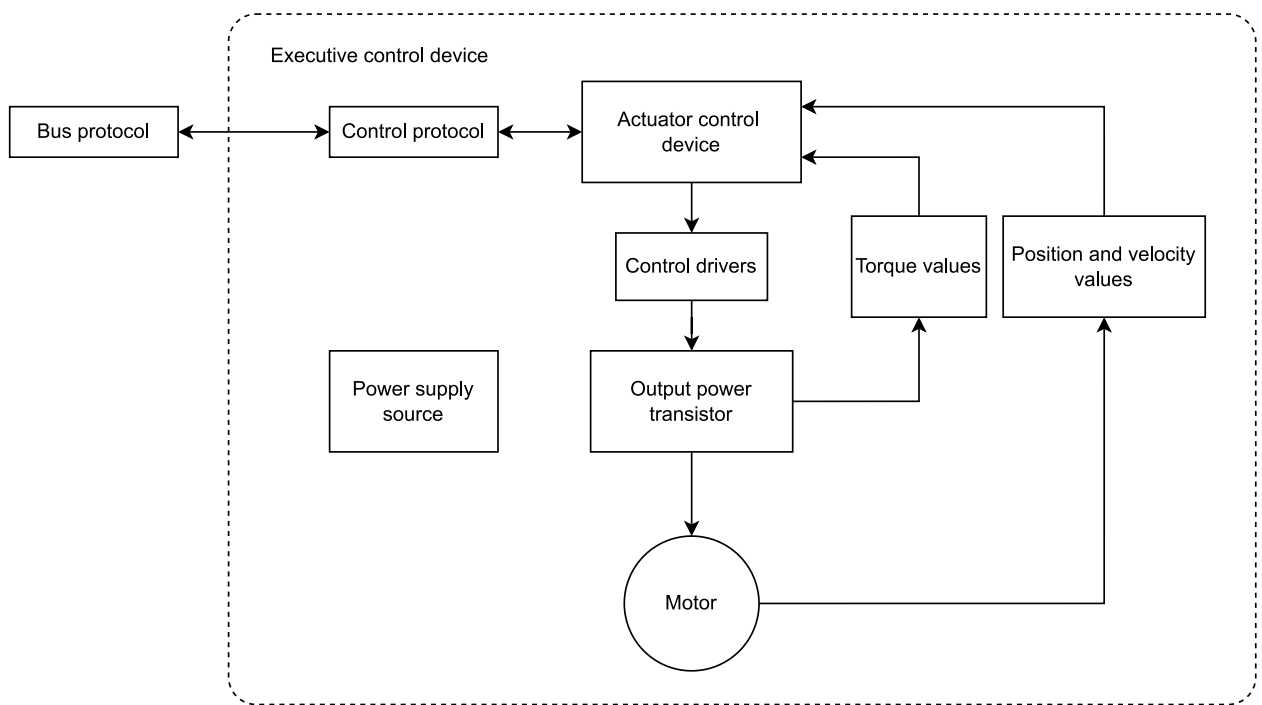


Рис. 2.3. Структурная схема устройства исполнительного управления

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 ACD 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 напряжения – 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 не критического 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).

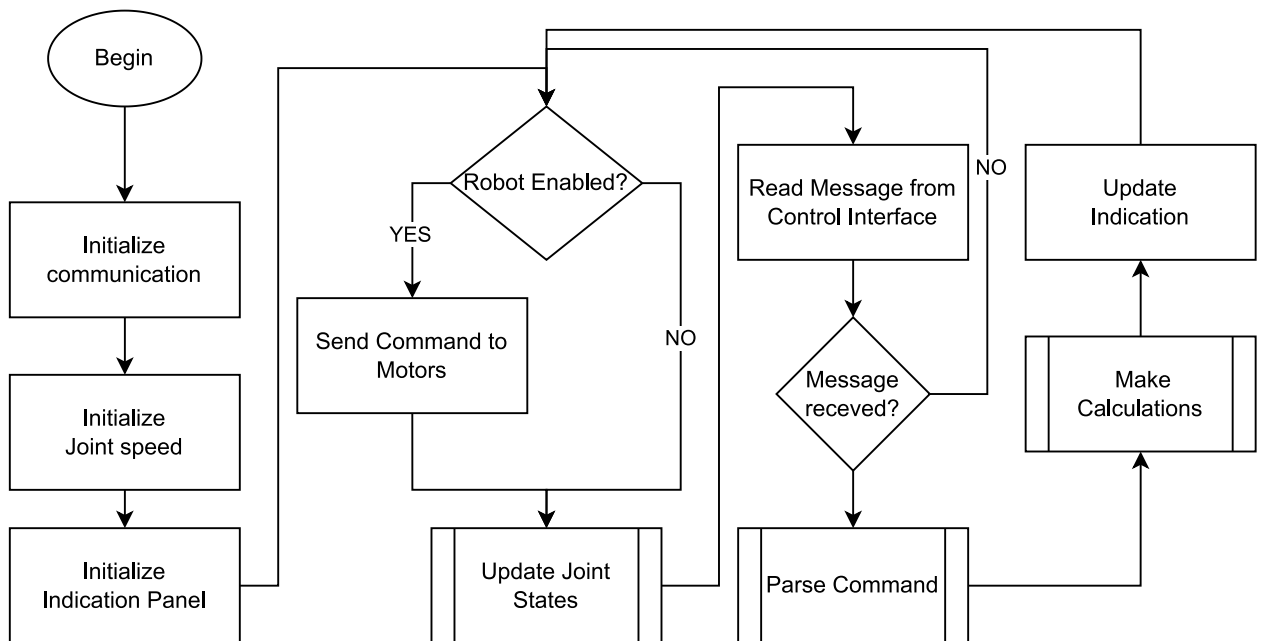


Рис. 2.4. Алгоритм работы устройства тактического управления

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 посылает 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 calculation».

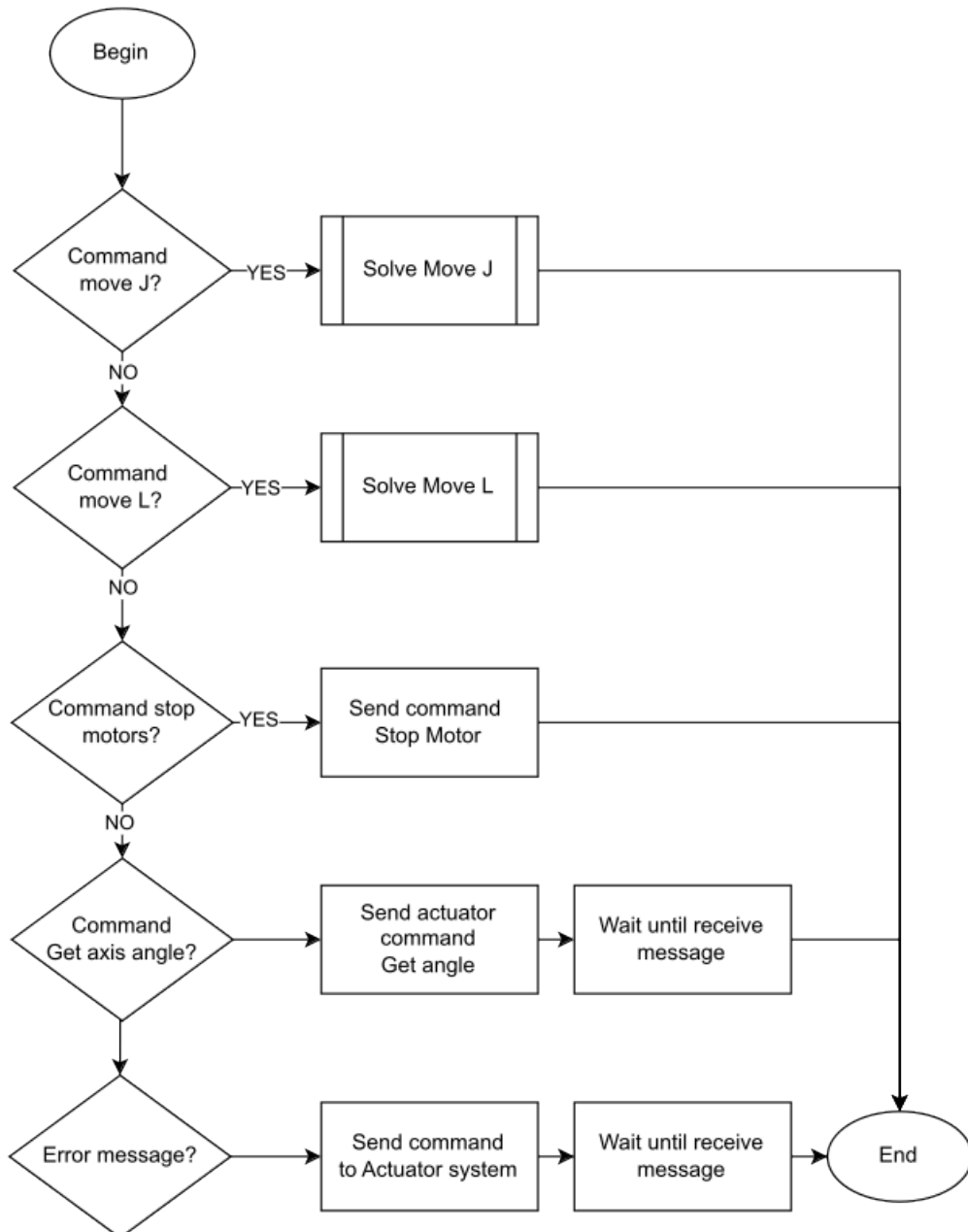


Рис. 2.5. Алгоритм «Parse command»

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.

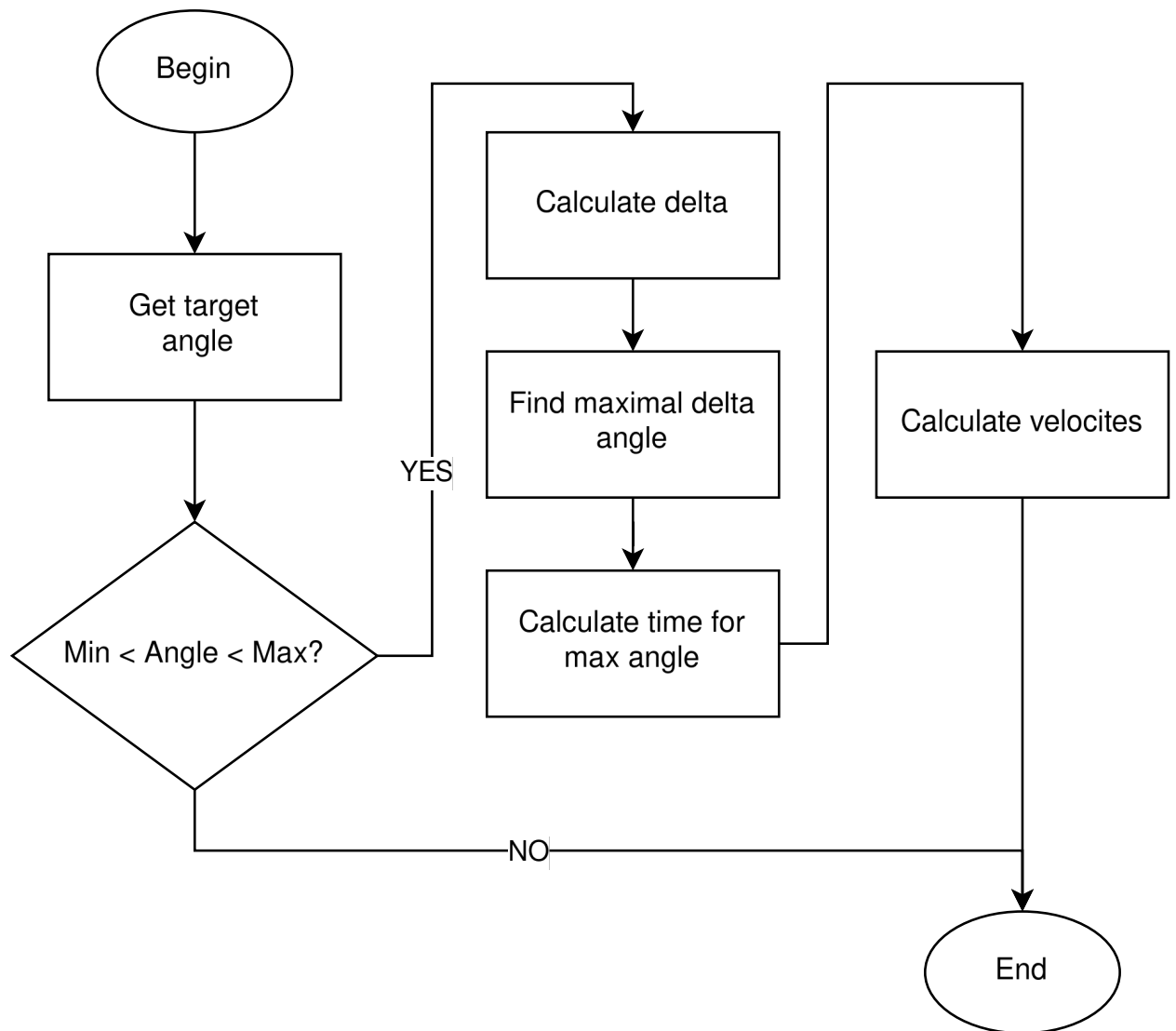


Рис. 2.6. Алгоритм подпрограммы «Move J»

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.

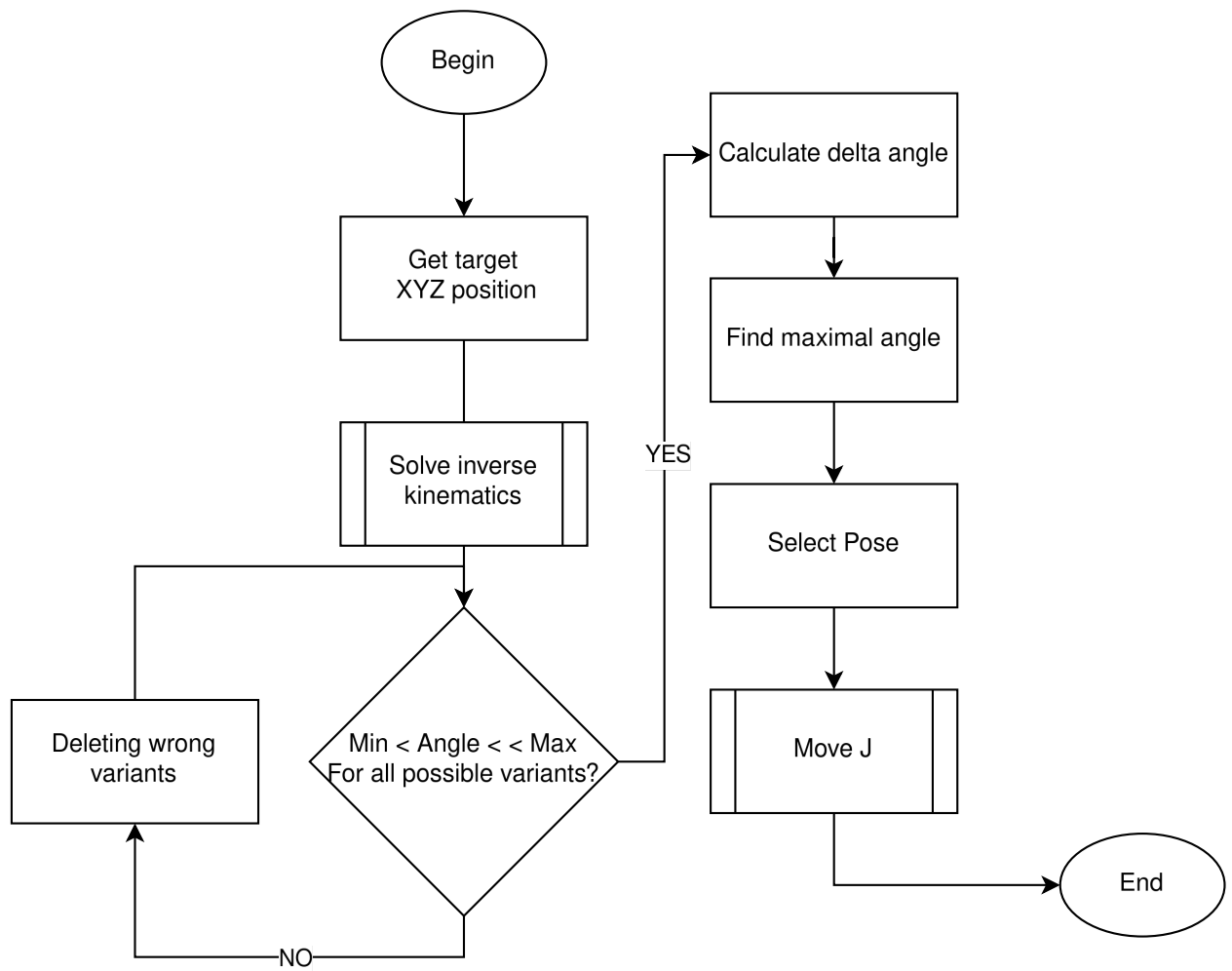


Рис. 2.7. Алгоритм подпрограммы «Move L»

2.5. Алгоритм работы устройства исполнительного управления

Алгоритм устройства исполнительного управления демонстрируется на рисунке 2.8. Данный 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.

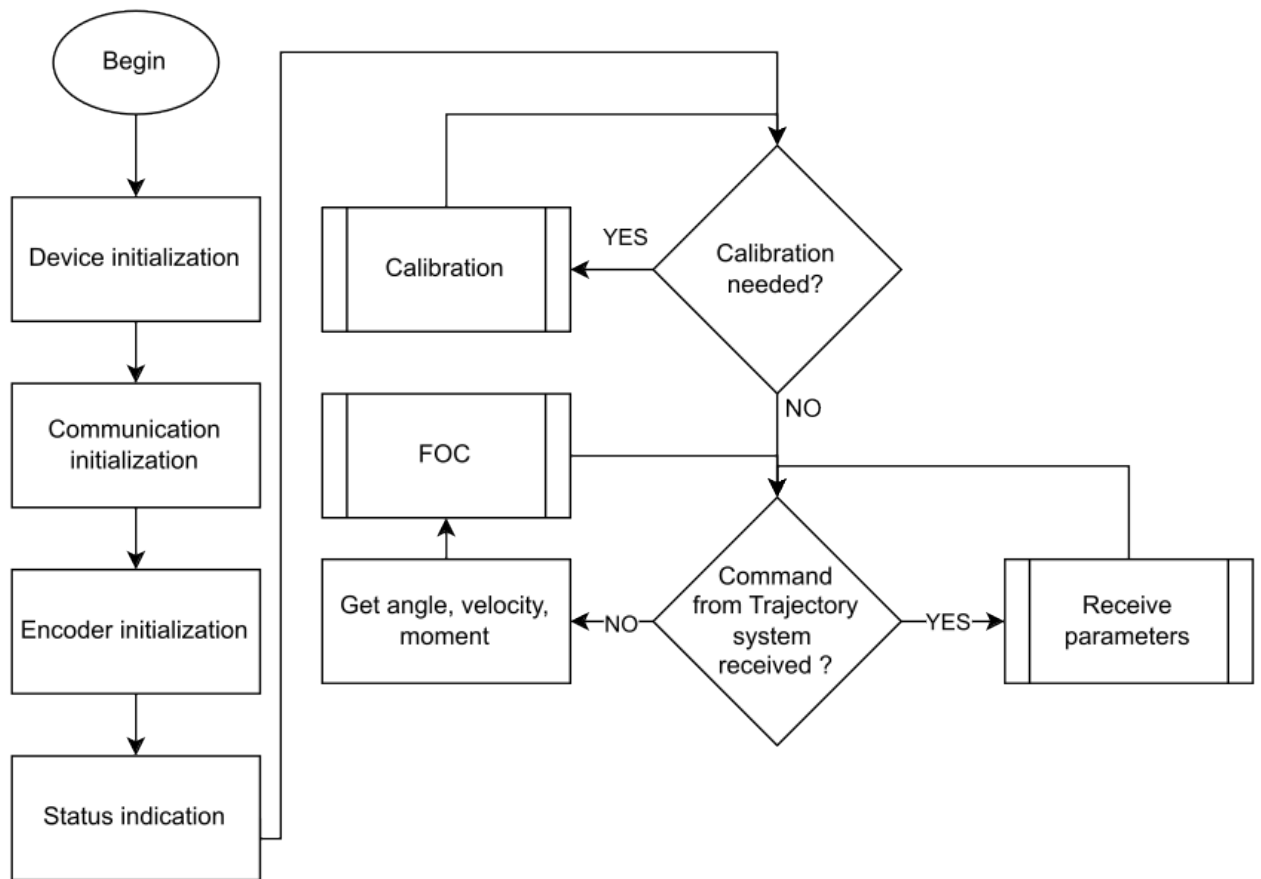


Рис. 2.8. Алгоритм работы «Actuator control device»

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 коэффициентов регулятора. Данные используются для вычисления параметров векторного регулирования. В случае получения сообщения на запрос данных, производится отправка параметров на устройство отправителя сообщения.

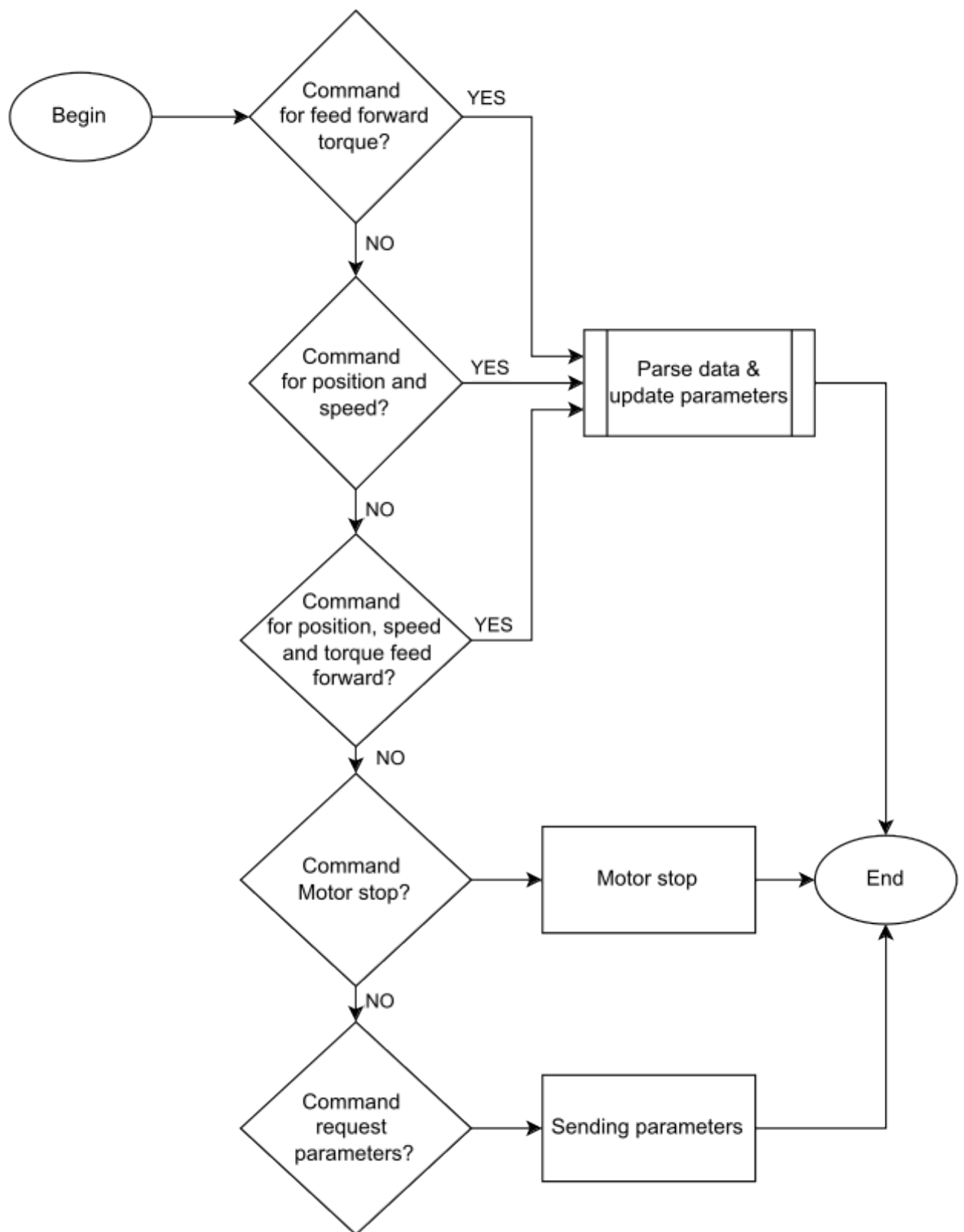


Рис. 2.9. Алгоритм работы подпрограммы «Receive parameters»

3 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИ РОБОТА

Проектируемая система предназначена для выполнения задач управления робота манипулятором. Нецелесообразно размещать устройства исполнительной управления (АСК) в одном месте ввиду их количества. Поэтому целесообразно решение располагать устройства исполнительной части (АСК) 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.

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. Lee, J.-K., Jung, D.-H., Kim, H.-W., Park, Y., Min, Y. G., Ko, K.-C., Kim, S., Park, W. & Lee, J. (2018), A study on design of torque motor for drone gimbal system, *in* '2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)', IEEE.
URL: <http://dx.doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8549483>
4. 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>
5. Ronin (2023), "ronin specs".
URL: <https://www.dji.com/lv/ronin/info>
6. 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>
7. Vid (2023), 'Mandatory State Social Insurance Contributions — vid.gov.lv'.
URL: <https://www.vid.gov.lv/en/mandatory-state-social-insurance-contributions/>