Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт машиностроения, материалов и транспорта

Высшая школа автоматизации и робототехники

Работа допущена к защите

Директор ВШАиР

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.Н. Волков

«\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_ г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

**Разработка системы управления для пятизвенного манипулятора c ременными передачами на шарниры**

по направлению подготовки: 15.03.06 Мехатроника и робототехника

код и наименование направления подготовки (специальности)

направленность (профиль): 15.03.06\_04 Автономные роботы

код и наименование направленности (профиля) образовательной программы

Выполнил

студент гр. 3331506/60401 <*подпись*> Д. Д. Сидоренко

Руководитель

ст. преподаватель <*подпись*> А. С. Габриель

Консультант

по нормоконтролю <*подпись*> С. Г. Чупров

Консультант

доцент ВШАиР,  
к.т.н <*подпись*> И. А. Васильев

Санкт-Петербург

2020

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО Институт машиностроения, материалов и транспорта**

**Высшая школа автоматизации и робототехники**

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОП

О.Н. Мацко

« » 20 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

студенту Сидоренко Данила Дмитриевича, 3331506/60401

фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. Тема работы: Разработка системы управления для пятизвенного манипулятора c ременными передачами на шарниры

2. Срок сдачи студентом законченной работы: Июль 2020 г.

3. Исходные данные по работе:

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):

Обзор существующих систем управления манипулятором

Решение задач кинематики для манипулятора

Сравнение методов решения ОЗК

Сравнение методов реализации обратной связи для шаговых двигателей

Реализация методов построения траекторий для манипуляторов

Сравнение методов построения траекторий для манипуляторов

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

6. Консультанты по работе: И.А. Васильев, к.т.н., доцент, ВШАиР СПбПУ

7. Дата выдачи задания «11» декабря 2019 г.

Руководитель ВКР А.С. Габриель

(подпись) инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению «11» декабря 2019 г.

(дата)

Студент Д.Д. Сидоренко

(подпись) инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 59 с., 18 рисунков, 5 таблицы, 5 приложения.

РОБОТОТЕХНИКА, МАНИПУЛЯТОР, ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ. ФОРМАЛИЗМ ДЕНАВИТА – ХАРТЕНБЕРГА, ОБОБЩЕННЫЕ КООРДИНАТЫ, ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ.

В настоящей работе проводится описание разработки бортовой программы управления для подвесного пятиосевого манипулятора с ременными приводами на шарнирах. В рамках исследования произведено описание кинематики манипулятора с использованием формализма Денавита – Хартенберга и с использованием геометрического представления. Так же в рамках работы получены решения обратной задачи кинематики с использованием методов, описанных выше. Сравнение полученных методов производилось по времени решения ОЗК для одного набора входных координат.

Перемещение рабочего органа манипулятора из одной точки в другую связано с построением траектории движения как самого рабочего органа, так и каждого сочленения в отдельности. В работе приводится описание и сравнение нескольких методов построения траекторий, как в декартовом пространстве, так и в пространстве обобщенных координат. Сравнение методов построения траекторий производится по гладкости первой и второй производных обобщенных координат, а также по времени обработки траектории.

ABSTRACT

For 59 p., 18 figures, 5 tables, 5 applications.

ROBOTICS, MANIPULATOR, DIRECT AND REVERSE PROBLEMS OF KINEMATICS. DENAVIT - HARTENBERG FORMALISM, GENERALIZED COORDINATES, PLANNING OF TRAJECTORIES.

In this paper, we describe the development of an on-board control program for a pendant five-axis manipulator with belt drives on hinges. As part of the study, the kinematics of the manipulator is described using the Denavit-Hartenberg formalism and using the geometric representation. Also in the framework of the work, solutions to the inverse kinematics problem were obtained using the methods described above. Comparison of the obtained methods was carried out by the time of solving the RPK for one set of input coordinates.

The movement of the working body of the manipulator from one point to another is associated with the construction of the trajectory of movement of both the working body itself and each joint individually. This paper describes and compares several methods for constructing trajectories, both in Cartesian space and in the space of generalized coordinates. Comparison of the methods for constructing trajectories is made by the smoothness of the first and second derivatives of the generalized coordinates, as well as by the processing time of the trajectory.

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 7](#_Toc43576291)

[1 Обзор готовых решений 13](#_Toc43576292)

[1.1 Matlab Robotic System Toolbox 13](#_Toc43576293)

[1.2 ROS MoveIt 14](#_Toc43576294)

[2 Решение задач кинематики 15](#_Toc43576295)

[2.1 Решение через ДХ представление 15](#_Toc43576296)

[2.2 ОЗК используя формализм ДХ 19](#_Toc43576297)

[2.3 Геометрический метод решения ОЗК 22](#_Toc43576298)

[2.4 Расчет углов шаговых двигателей и сервоприводов 25](#_Toc43576299)

[2.5 Сравнение решений 28](#_Toc43576300)

[2.6 Вывод по разделу 29](#_Toc43576301)

[3 Отслеживание положения. Обратная связь по положению 30](#_Toc43576302)

[3.1 Отслеживание положений энкодеров 30](#_Toc43576303)

[3.2 Метод захвата сигнала таймера 32](#_Toc43576304)

[3.3 Интегральный метод вычисление положения 34](#_Toc43576305)

[3.4 Сравнение методов вычисления положения 36](#_Toc43576306)

[3.5 Вывод по разделу 39](#_Toc43576307)

[4 Планирование траектории 40](#_Toc43576308)

[4.1 Описание траекторий методом трапеции 42](#_Toc43576309)

[4.2 Описание траекторий полиномом тертьей степени 44](#_Toc43576310)

[4.3 Описание траекторий полиномом пятой степени 45](#_Toc43576311)

[4.4 Сравнение методов описания траектории 47](#_Toc43576312)

[4.5 Вывод по разделу 50](#_Toc43576313)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 51](#_Toc43576314)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ 52](#_Toc43576315)

[ПРИЛОЖЕНИЕ А 55](#_Toc43576316)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Б 56](#_Toc43576317)

[ПРИЛОЖЕНИЕ В 57](#_Toc43576318)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Г 58](#_Toc43576319)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Д 59](#_Toc43576320)

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей работе применяются следующие обозначения и сокращения.

|  |  |
| --- | --- |
| ЗУ | – Захватное устройство |
| ДХ | – формализм Денавита – Хартенберга |
| ПЗК | – прямая задача кинематики |
| ОЗК | – обратная задача кинематики |
| ШД | – шаговый двигатель |
| МР | – мотор-редуктор |
| ЗР | – задающие рукоятки |

ВВЕДЕНИЕ

В рамках гранта Фонда содействия инновациям и гранта «УМНИК» 2019 командой резидентов «ФАБЛаб Политех» разрабатывается полезная нагрузка для телеуправляемого катамарана. Согласно техническому заданию манипулятор предназначен для сбора плавающих объектов с поверхности воды. Так же в конструкцию манипулятора была заложена возможность обслуживания и замены аккумуляторов на сигнальных буях.

Манипулятор предусматривает управление как в ручном, так и в автоматическом режимах с пульта корабля сопровождения. Для эргономичного управления движением манипулятора необходимо преобразовывать движение задающих рукояток на пульте управления в изменение декартовых координат рабочего инструмента манипулятора. Что приводит к необходимости преобразования декартовых координат захватного устройства в обобщенные координат манипулятора.

Так же для перемещения рабочего органа манипулятора из одной точки в другую необходимо построить траекторию движения каждого звена манипулятора в пространстве обобщены координат. При необходимости строится траектория рабочего органа манипулятора в декартовом пространстве.

Общая структура программы управления манипулятором представлена на рисунке 1 [1,2].

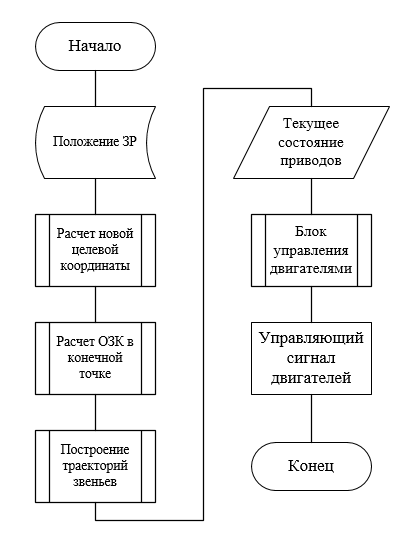


Рисунок 1 – Общая структурная схема алгоритма

В блоке расчета новой целевой координаты происходит перевод заданных оператором с помочью ЗР (задающих рукояток) скоростей в текущее положение целевой точки. Блок построения траекторий отвечает за расчет траектории между начальной и конечной конфигурацией манипулятора. Решение задач кинематики производится в блоке расчета ОЗК (обратная задача кинематики).

В работе последовательно рассматриваются методы решения задач кинематики и построения траекторий. Так же присутствует сравнение методов реализации обратной связи по положению для шаговых двигателей замкнутого

Далее приведены кинематическая и принципиальная электрическая схемы манипулятора и пояснения ним.

На рисунке 2 приведена кинематическая схема манипулятора [3,4].



Рисунок 2 – Кинематическая схема манипулятора

На валу МР1 (мотор-редуктор) установлен шкив 1. С обратной стороны установлен инкрементальный энкодер. МР1 приводит в движение ось колонны манипулятора. К корпусу колонны присоединены мотор-редуктора 2, 3 и 4.

МР4 через неразъемную муфту со шпоночным пазом передает вращение на вал IV. На валу IV жестко закреплены шкив 5 и подвижная головка инкрементального энкодера. Корпус энкодера в свою очередь жестко соединен с корпусом колонны. Так же вал IV соединён с корпусом колонны через шариковый опорный подшипник. Вращение со шкива 5 передается на шкив 6, который в свою очередь жестко закреплен на валу V с помощью шпоночного соединения. Вал V жестко соединен с корпусом плеча. Вышеописанная кинематическая цепь приводит в движение плечо манипулятора.

Конструкция вала II, соединенного с МР2, аналогична валу VI. Вращательное движение со шкива 3 передается на шкив ступичный 7, который закреплен на валу V через пару шариковых опорных подшипников. Далее вращательное движение со ступичного шкива 7 передается на шкив 10, который жестко соединен с валом VI с помощью шпоночного соединения. Вал VI в свою очередь жестко соединен с корпусом предплечья. Вышеописанная кинематическая цепь приводит в движение предплечье манипулятора. Особенность поворота шарнира предплечья состоит в том, что обобщенные координаты поворота предплечья зависят не только от координат МР2, но и от обобщенных координат плеча.

Конструкция вала III аналогична ранее рассмотренным. Передача момента на кисть манипулятора осуществляется аналогично с передачей момента на предплечье, за одним исключением, что обобщенные координаты крена кисти зависят не от одной родительской координаты, а от двух.

Согласованное изменение координат МР1, МР2, МР3 обеспечивает изменение декартовых координат рабочего инструмента, а изменение координат МР4 и Д1 изменение ориентации устройства.

Данная кинематическая схема создает особенности расчета управляющих сигналов мотор-редукторов в зависимости от положения ременных приводов в пространстве. Обобщенные координаты углов между плечом и предплечьем, а также между предплечьем и кистью зависят не только от координат управляющих приводов, но и от обобщенных координат родительских звеньев. Для корректного расчета управляющих сигналов МР3 и МР4 необходимо добавить блок расчета новых управляющих сигналов.

Для понимания особенностей проектирования системы управления манипулятором на рисунке 3 приведена электрическая функциональная схема управляющего контроллера манипулятора. На схеме опущены преобразователи уровней управляющих сигналов приводов и датчиков. Также на схеме опущены преобразователи уровней UART и RS485. Для удобочитаемости схема питания узлов и гальванические развязки также не показаны.

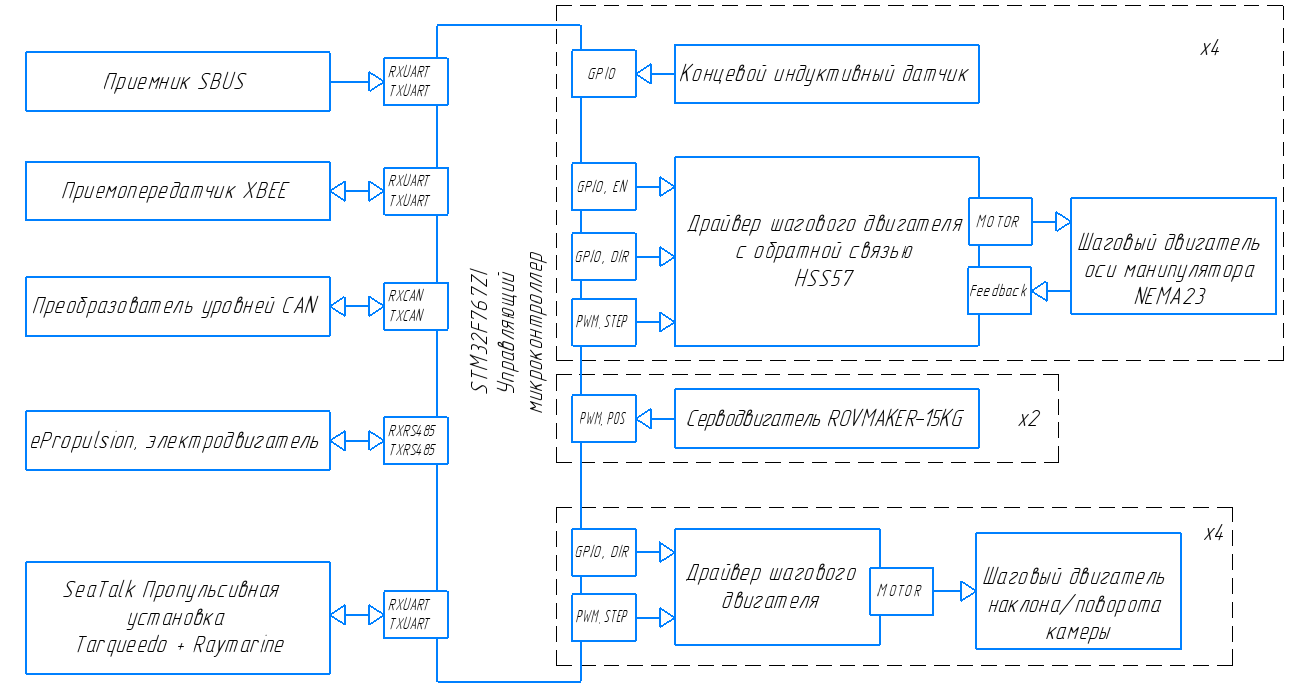


Рисунок 3 – Электрическая функциональная схема манипулятора

В работе подробно рассматривается управление шаговыми двигателями осей манипулятора и серводвигателями, обеспечивающими крен ЗУ манипулятора и рабочее движение ЗУ манипулятора.

Как видно из рисунка 3 для управления шаговым двигателем необходимо использовать 2 пина ввода-вывода для задания направления вращения и активации драйвера. А также для установки скорости вращения используется аппаратная генерация ШИМ сигнала и отдельный вывод таймера микроконтроллера для каждого двигателя. Требуется использовать отдельный таймер для каждого ШД, так как управление происходит благодаря изменению частоты ШИМ сигнала. Каждый передний фронт ШИМ сигнала сообщает драйверу, что необходимо повернуть ротор ШД на один микрошаг в сторону, соответствующую направлению, заданному пином DIR. При этом для корректной работы микроконтроллера драйвера производитель рекомендует поддерживать скважность сигнала близкой к 50 процентам. Драйвер шагового двигателя HSS57 осуществляет обратную связь с шаговым двигателем с помощью инкрементального энкодера, установленного на оси двигателя. Данная функция драйвера обеспечивает отработку команд управления и дает защиту от пропуска шагов.

Для управления серводвигателем необходим один управляющий сигнал, задающий положение ротора привода. В корпусе серводвигателя установлен абсолютный энкодер, обеспечивающий обратную связь по положению. Управляющий сигнал представляет из себя ШИМ сигнал с частотой 600 Гц. Положение ротора задается путем изменения скважности ШИМ сигнала, которая может меняться от 100 мкс до 300 мкс. Угол поворота серводвигателя ограничен 120 градусами, что соответствует скважности в 300 мкс. Так как управление серводвигателя построено на изменении скважности ШИМ сигнала, то целесообразно будет выделить один таймер с двумя внешними каналами для генерации управляющих сигналов.

# Обзор готовых решений

## Matlab Robotic System Toolbox

Первая кинематическая модель манипулятора была создана с применением пакета Matlab Robotic System Toolbox. Данный пакет применим не только к манипуляционным роботам, а также и к мобильным. Он имеет встроенные решения SLAM и может интегрироваться с ROS. Инструменты пакета для управления манипуляционными роботами:

* построение древовидной структуры манипуляционных систем;
* построение кинематической и динамической моделей роботов;
* решение обратной задачи кинематики итерационными алгоритмами Левенберга – Марквардта и Бройана –Флетчера – Гольдфарба – Шанно;
* алгоритмы решения.

Модули управления манипулятором в Matlab после преобразования скрипта в код на C++ заняли размер 8 МБ, что было недопустимо для размера памяти микроконтроллера всего 256 кбайт. Так же использование методов Robotic System Toolbox не позволяло задать углы крена и тангажа кисти, и при каждом вызове решения необходимо переводить углы Эйлера в матрицу поворота, что отрицательным образом сказывается на быстродействии системы.

Параметры модели, созданной с помощью данного пакета, приведены в ПРИЛОЖЕНИИ А – Модель манипулятора Robotic System Toolbox.

## ROS MoveIt

Данное расширение для ROS разработано специально для управления манипуляторами. Функционал расширения:

* генератор траекторий, избегающий локальных минимумов;
* анализ взаимодействия захватного устройства со средой;
* решение обратной задачи кинематики, в том числе и для манипуляторов с большим числом степеней свободы, больше шести;
* исполнение команд на контроллерах приводов;
* подключение к датчикам глубины и камерам RGBZ;
* построение траекторий в изменяющейся среде, благодаря обработке облака точек, поступающего с RGBZ камер.

Среда разработки STM32, в связи с ограничениями разработчиками ROS и возможностями микроконтроллера поддерживает только урезанную версию данной системы – rosserial\_client, которая не позволяет воспользоваться возможностями расширения.

# Решение задач кинематики

Для реализации системы управления манипулятором необходимо решить, как прямую, так и обратную задачи кинематики. Для рассматриваемого манипулятора приводится решение ОЗК через геометрическое представление кинематических связей и через формализм ДХ.

## Решение через ДХ представление

Одним из способов задания системы координат для геометрии манипулятора для решения прямой и обратной задач кинематики является представление Денавита – Хартенберга, которое кинематически связывает сочленения звеньев. Описание связей происходит с помощью матриц 4х4 и однородных преобразований. Начальная система координат связана с основанием манипулятора и имеет нулевой номер. Ниже приведен алгоритм назначения и описание систем координат звеньев, а также нахождения параметров ДХ для каждого сочленения 1 – 5 [5,6].

Оси следует направить параллельно осям дочернего вращательного сочленения.

Началом i-й системы координат служит точка пересечения осей  и , либо точка пересечения нормали к тем же осям и оси .

Ось задается следующим соотношением , если оси  и  параллельны, то ось задается вдоль общей нормали к этим осям.

Ось дополняет уже заданные оси в каждом сочленении до правосторонней системы координат.

Параметры ДХ:

* расстояние от точки начало координат системы координат до точки пересечения осей и является параметром ;
* расстояние от пересечения оси c общей нормалю осей и до начала i-й система координат является параметром ;
* угол поворота от оси до оси является параметром ;
* угол поворота от оси до оси относительно оси является параметром ;

Ниже на рисунке 4 приведена кинематическая схема с выбранными системами координат. Примем данное положение манипулятора за нулевое.

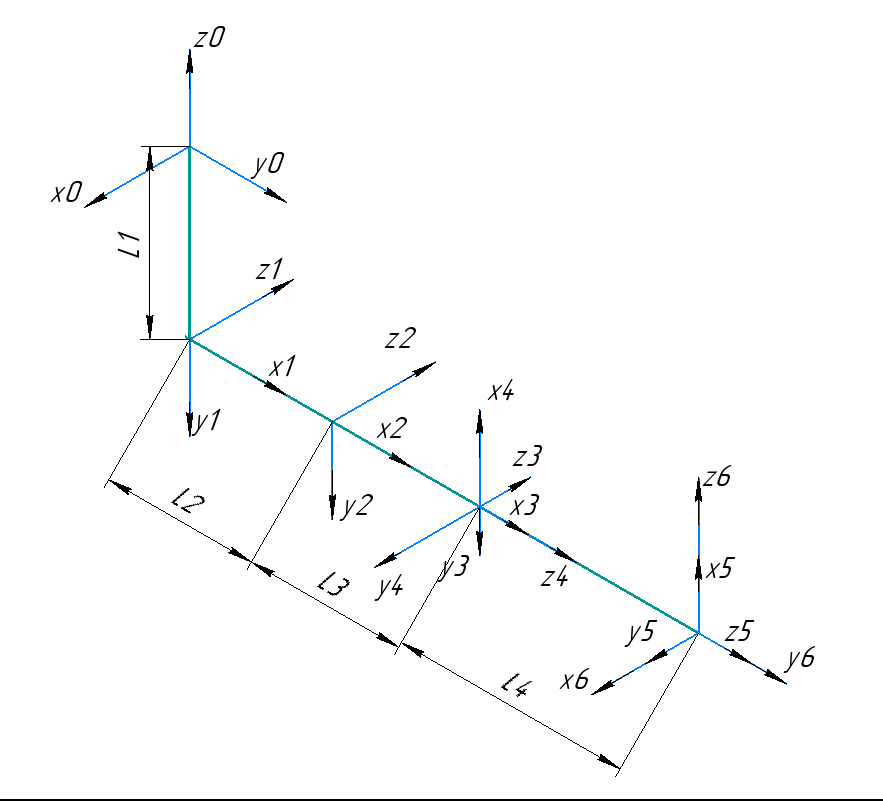


Рисунок 4 – схема выбраных систем координат

В таблице 1 представлены параметры ДХ для данной конструкции манипулятора.

Таблица 1 - Значение параметров ДХ

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| α | π/2 | 0 | 0 | -π/2 | 0 | π/2 |
| θ | -π/2 | 0 | 0 | -π/2 | 0 | π/2 |
| a | 0 | L2 | L3 | 0 | 0 | 0 |
| d | -L1 | 0 | 0 | 0 | L4 | 0 |

Здесь . выступает в роли присоединительной координаты, а значения, указанные в таблицы, являются нулевыми.

Шестое сочленение было введено для удобства измерения декартовых координат в матрице T6. В нулевом положении оси шестой системы координат сонаправлены с осями базовой системы координат.

Связь системы координат последнего, шестого, звена манипулятора с базовой системой координат осуществляется благодаря матрице однородного преобразования T6, представленной в формуле (1).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Последовательное перемножение матриц поворота и переноса, согласно методу ДХ, дает матрицу , представленная в формулах (2), (3).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Матрица осуществляет переход от системы координат к i-й.

Матрица имеет вид, представленный в формуле (3).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

где , , – элементы матрицы поворота R;

– вектор положения координат захватного устройства относительно базовой системы координат.

Так как 6 сочленение мнимое, то матрица известна заранее и представлена в формуле (4).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

Получившиеся уравнения имеют вид, представленный в формулах (5-16).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |
|  | (6) |
|  | (7) |
|  | (8) |
|  | (9) |
|  | (10) |
|  | (11) |
|  | (12) |
|  | (13) |
|  | (14) |
|  | (15) |
|  | (16) |

Как видно из уравнений выше, параметры шестого сочленения никак не учувствуют в конечном расчете и не усложняют систему.

Полученная система уравнений позволяет решать ПЗК (прямая задача кинематики) – нахождение декартовых координат захватного устройства в зависимости от обобщенных координат манипулятора. Так же нахождение элементов px, py, pz для матриц однородного преобразования T6, T4 и T3 позволяет избегать столкновений с дном катамарана.

Решение системы уравнений относительно обобщенных координат манипулятора позволит решить ОЗК, что является одним из блоков системы управления манипулятором в целом.

## ОЗК используя формализм ДХ

Решим получившуюся систему уравнений и найдем зависимость обобщенных координат от декартовых координат. Для удобства будем обозначать как , косинус суммы углов как . Для синусов введем аналогичные обозначения.

Из уравнения (13) получим формулу (17).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (17) |

Далее из формул (14) и (15) получим значение (18).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (18) |

Если , то из формул (7) и (10) следует формула (19).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (19) |

Если , то и тогда из формул (4) и (8) следует формула (20).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (20) |

Знак появляется из-за периодичности тригонометрических функций.

Из формул (14) и (15) можно получить формулу (21).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (21) |

Далее из формул (16) и (21) можно вывести формулы (22, 23).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (22) |
|  | (23) |

Из выражений (22) и (23) получается формула (24).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (24) |

Из выражения (24) найдем угол в формуле (25).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (25) |

Раскладывая сумму косинусов и синусов в выражениях (22) и (23) получаются формулы (26, 27).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (26) |
|  | (27) |

Далее умножив выражения (26) и (27) на и и сложив их друг с другом получается формула (28).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (28) |

Далее умножив выражения (26) и (27) на и и сложив их друг с другом получается формула (29).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (29) |

Умножив выражения (28) и (29) на и и сложив их друг с другом, затем умножив те же выражения на и и так же сложив получаются формулы (30, 31).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (30) |
|  | (31) |

Из выражений (30) и (31) найден угол в формуле (32(.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (32) |

И в конце из выражений (17), (25) и (32) найден угол в формуле (33).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (33) |

ОЗК решена. Сводное решение приведено в таблице 2.

Таблица 2 - Сводная таблица решения ОЗК

|  |  |
| --- | --- |
| 1 |  |
| 2 |  |
| 3 |  |
| 4 |  |
| 5 |  |
| Дополнительные параметры | |
|  |  |
|  |  |

Решение ОЗК с помощью представления ДХ для данной системы управление будет избыточным, так как для ориентации ЗУ в пространстве оператор с помощью рукояток управления задает углы крена и тангажа, а представление ДХ предполагает задание матрицы поворота. Чтобы использовать данное решение необходимо будет переводить вторую систему углов Эйлера (крен, тангаж, рысканье) в матрицу поворота, что увеличит число операций и негативно скажется на времени вычислений. Применив альтернативный метод решения ОЗК с помощью геометрической интерпретации кинематики сочленений манипулятора.

## Геометрический метод решения ОЗК

Для данного метода необходимо ввести несколько новых углов, которые показаны на рисунке 5 [7]. Так же перенесем точку начала базовой системы координат в сочленение первого и второго звеньев, что позволит исключить длину первого звена из расчетов.

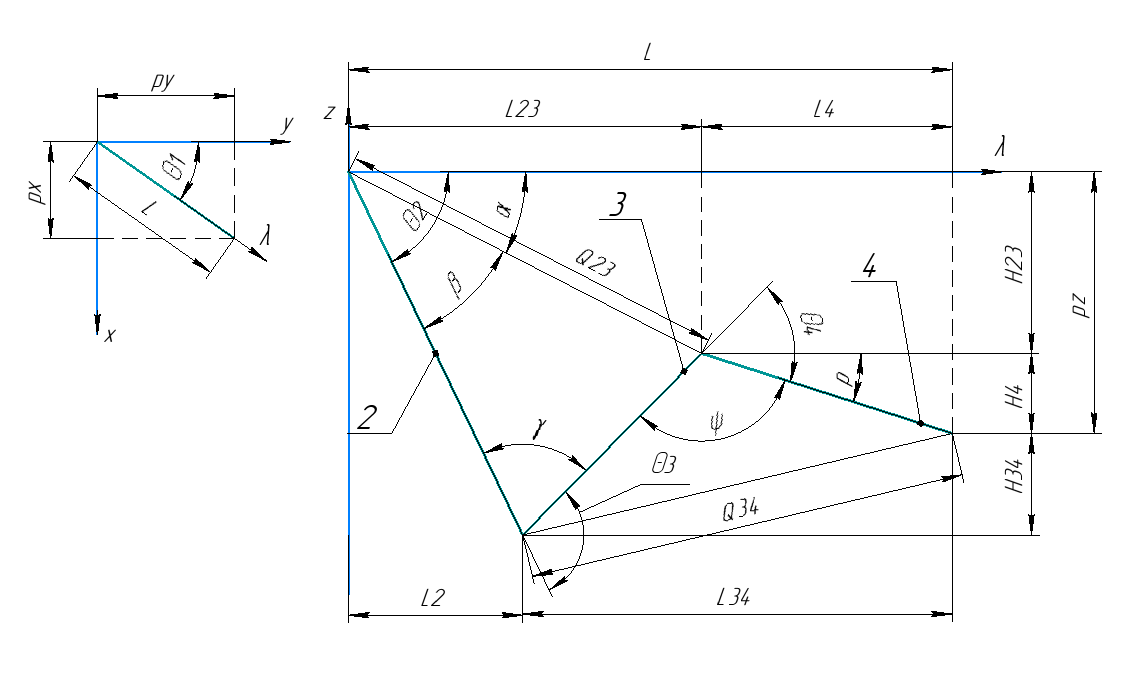


Рисунок 5 – Геометрическое описание кенематических связий

На рисунке 5 слева представлена проекция манипулятора на плоскость xOy. Введя новую ось λ так, что звенья манипулятора лежат в плоскости zOλ. На рисунке 5 справа представлено расположение манипулятора в плоскости zOλ. Так же на рисунке 5 обозначены длины отрезков, которые потребуются для дальнейшего решения.

Использование геометрического подхода позволит находить угол без дополнительных вычислений, сократит количество уравнений и избавит от необходимости перевода углов Эйлера в матрицу поворота.

Оператор задает приращения координат, показанных в таблице 3.

Таблица 3 - Координаты

|  |  |
| --- | --- |
| Обозначение | Название |
| *x* | Значение координаты x, px на чертеже |
| *y* | Значение координаты y, py на чертеже |
| *z* | Значение координаты z, pz на чертеже |
| *r* | Значение угла крена (roll) |
| *p* | Значение угла тангажа (pitch) |

Так как за расчет скоростей приводов отвечает другой блок системы управления, то для данного раздела применив значения из таблицы за абсолютные. Для расчетов все угловые значения выражаются в радианах. Размерность линейных размеров для данной задачи не важна, так как легко масштабируется.

Значение угла можно найти без каких-либо расчетов из формулы (34).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (34) |

Далее найдем длину проекции манипулятора на плоскость *xOy* в формуле (35).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (35) |

Угол можно найти из формулы (36).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (36) |

Далее из формул (37-42) находятся дополнительные значения и по теореме косинусов находится значение угла

|  |  |
| --- | --- |
|  | (37) |
|  | (38) |
|  | (39) |
|  | (40) |
|  | (41) |
|  | (42) |
|  | (43) |

Далее из формул(44-50) находятся значение углов и по такому же принципу.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (44) |
|  | (45) |
|  | (46) |
|  | (47) |
|  | (48) |
|  | (49) |
|  | (50) |

## Расчет углов шаговых двигателей и сервоприводов

Обозначив углы приводов как . Вращение мотор-редукторов по часовой стрелке примем за положительное. Шаговые двигатели имеют дискретность в 2000 шагов на оборот, а сервопривод 360 шагов на оборот. Изначально все обобщенные координаты рассчитывались в радианах. Такая система координат при необходимости позволит сократить число вычислений с плавающей точкой на микроконтроллерах, не обладающих аппаратными возможностями для быстрых операций с плавающей точкой. Применяя, что нулевое положение всех шаговых двигателей и сервоприводов совпадает с нулевым положением манипулятора. Все шаговые двигатели оснащены редукторами с соотношением 1:5. Будем вести расчет координат шаговых двигателей сразу в шагах, а координат сервопривода в градусах.

Функция перевода радиан в координаты шаговых двигателей представлена в формуле (51).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (51) |

Функция перевода обобщенных координат в координаты сервоприводов представлена в формуле (52).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (52) |

На рисунке 6 приведен кинематический узел, обеспечивающий поворот манипулятора вокруг оси z.

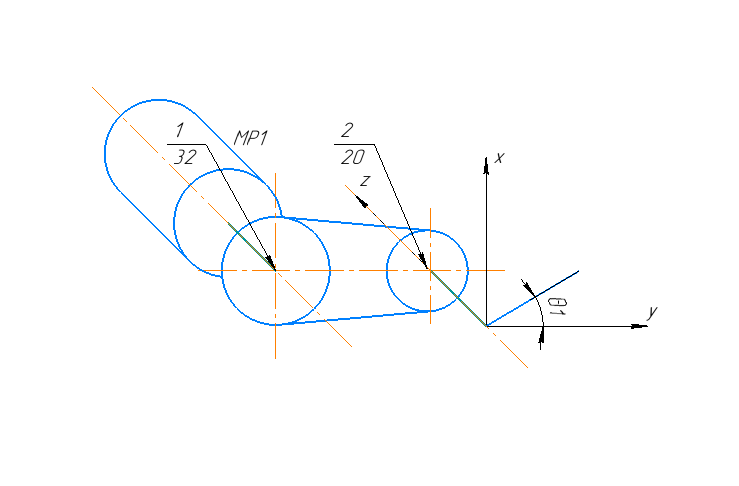


Рисунок 6 – Узел поворота манипулятора

Из рисунка 6 получается формула (53).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (53) |

Далее на рисунке 7 приведена пространственная кинематическая схема, которая позволяет найти углы , и .

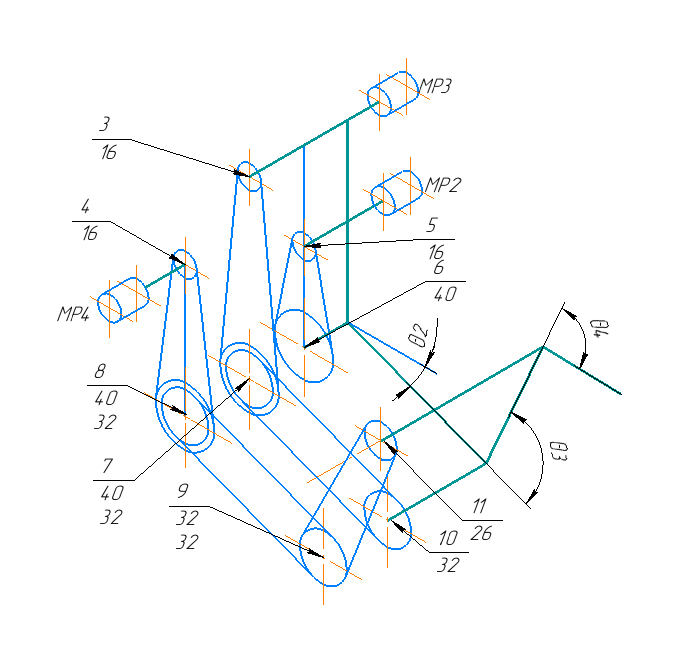


Рисунок 7 – Кинематическая схема зависивых приводов

Из рисунка 7 следует формула (54).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (54) |

Далее для расчёта углов и следует учесть, что данные координаты зависят не только от обобщенных координат сочленения, но и от обобщенных координат родительских сочленений. Значения этих углов приведены в формулах (55-57).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (55) |
|  | (56) |
|  | (57) |

## Сравнение решений

Сравнение полученных методов решения ОЗК производилось по времени работы решения. Для сравнения использовался микроконтроллер STM32F103T6 с тактовой частотой 8 МГц. Для более корректного сравнения алгоритмов оптимизацию компилятора примем за O0. Программный код для метода ДХ приведен в ПРИЛОЖЕНИИ В, программный код для метода геометрического представления структурно эквивалентен ПРИЛОЖЕНИЮ Б. На рисунке 9 представлены диаграммы сравнения двух способов решения ОЗК – с помощью геометрического представления звеньев и с помощью формализма ДХ. На диаграммах представлено время расчета одного решения ОЗК в мс. Так же на рисунке 8 приведена диаграмма аналогичного сравнения для микроконтроллера ATMega 2560 на восьми-битной архитектуре. Как видно из графиков, решение с использованием геометрического представления дает результат примерно в 3 раза быстрее, чем решение с использованием формализма ДХ, не зависимо от архитектуры микроконтроллера. Для дальнейшей разработки бортовой программы манипулятора применяется решение через геометрическое представление манипулятора как основное.

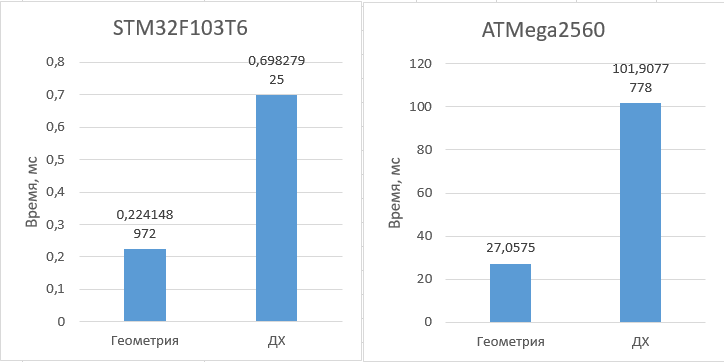


Рисунок 8 – Сравнение решений ОЗК

## Вывод по разделу

В результате сравнения полученных методов решения ОЗК было выбрано решение через геометрическое представление кинематических связей, как наиболее быстрое.

# Отслеживание положения. Обратная связь по положению

## Отслеживание положений энкодеров

Для осуществления обратной связи по положению между микроконтроллером и шаговым двигателей применяются различные методы. Самый простой и надежный метод, это отслеживание сигналов энкодеров, подключенных к драйверу шаговых двигателей. Для реализации данного метода в микроконтроллерах STM32 предусмотрена опция таймеров для аппаратной обработки сигналов инкрементальных энкодеров [8]. Для реализации данной опции необходимо для каждого двигателя выделить таймер, способный работать в энкодерном режиме, и дополнительно два вывода микроконтроллера, связанные с двумя каналами таймера. Обрабатывать сигнал энкодеров способны таймеры 1-5 и 8. На рисунке 9 представлена схема работы инкрементального энкодера, основанного на оптопарах [9,10].

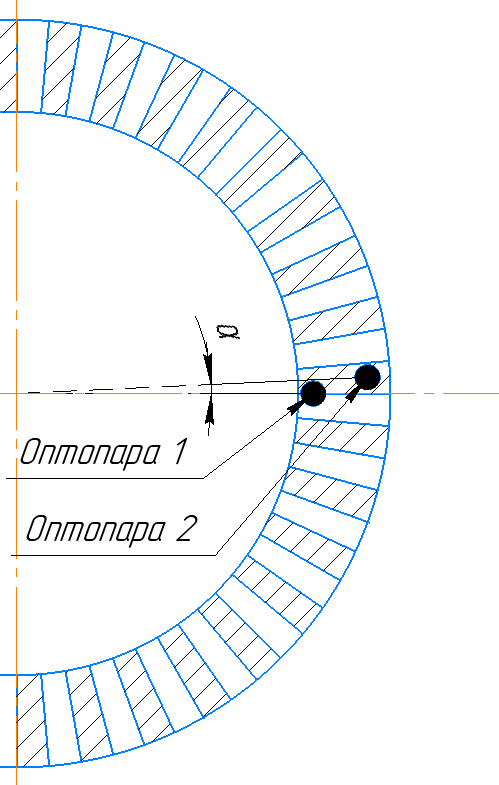


Рисунок 9 – Схема инкрементального энкодера

ШД nema 23 компонуются энкодерами, изготовленными из прозрачных дисков. По диаметру данных дисков через одинаковое расстояние нанесены штрихи, которые не пропускают свет, на рисунке обозначены штриховкой. Количество штрихов определяет дискретизацию измерения положения энкодера такого типа. В работе рассматриваются энкодеры, дискретизация которых составляет 1000 шагов на оборот, или 0,36 градуса. Смещение одной оптопары на угол α, равный половине угла дискретизации позволяет устанавливать направление выражения вала двигателя. Принцип детектирования положения ротора показан на рисунке 10 [11–13].

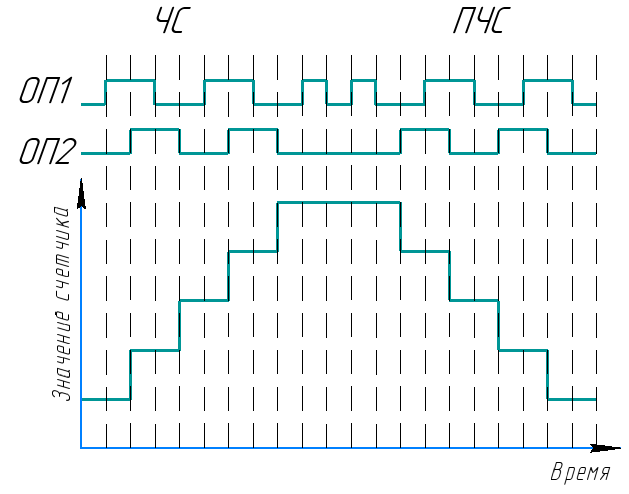


Рисунок 10 – Принцип подсчета положения энкодера

На рисунке 10 ЧС и ПЧС обозначает вращение по часовой стрелке и против часовой стрелки соответственно. ОП1 и ОП2 обозначают соответственные оптопары. Благодаря запаздыванию либо опережению фронта сигнала ОП2 относительно сигнала ОП1 определяется направление вращения. Так как для изменения значения положения таймеру микроконтроллера необходимо детектировать 2 последовательных сигнала на двух выводах, то увеличение или уменьшение счетчика таймера происходит не на одну, а на две единицы. То есть один оборот шагового двигателя все равно соответствует 1000 шагам энкодера, дискретизация так же составит 0,36 градуса, но при полном обороте в регистре счетчика таймера будет находится значение 2000.

Данный метод имеет значительный минус в количестве дополнительно используемых выводов и таймеров микроконтроллера. При использовании данного метода для работы одного двигателя необходимо использовать 5 выводов микроконтроллера, 3 для управления: STEP, DIR, EN, а также 2 для обеспечения обратной связи. При этом необходимо задействовать 2 таймера, один для генерации ШИМ сигнала, и один для отслеживания положения инкрементального энкодера.

## Метод захвата сигнала таймера

Второй метод отслеживания положения представляет из себя уже не прямую, а косвенную обратную связь двигателя с микроконтроллером. Так как драйвер шагового двигателя обеспечивает своевременное коммутирование обмоток, и засчёт обратной связи драйвера и двигателя с энкодером обеспечивается отсутствие пропуска шагов и обработка управляющих команд в реальном времени, можно разделить линию обратной связи. Таким образом, драйвер обрабатывает информацию, поступающую с энкодеров, а микроконтроллер обрабатывает ШИМ сигнал, генерируемый им же. Таймеры в микроконтроллерах STM32 могут работать не только в режиме генерации ШИМ сигнала, но и в режиме захвата сигнала. Таким образом, можно отслеживать какое количество импульсов было послано на драйвер двигателя, соответственно на какое количество шагов повернулся вал двигателя. Для данного метода так же необходимо при каждом срабатывании прерывания на следящем таймере учитывать, какой уровень задан на управляющем пине DIR, и в зависимости от него инкрементировать, либо декрементировать текущее положение двигателя. Для реализации представленного метода так же необходимо задействовать дополнительный таймер и дополнительный вход микроконтроллера. Стоит отметить, что некоторые таймеры 1-5 и 8 могут работать в подчинённом режиме, что позволяет назначить одному таймеру роль ведущего, а второму ведомого. Данная опция позволяет отслеживать сигналы внутри микроконтроллера не соединяя выводы.

Описанные выше два метода подразумевают использование дополнительного таймера для каждого шагового двигателя. Ниже в таблице 4 приведены возможности таймеров микроконтроллера STM32F767ZI.

Таблица 4 – Возможности таймеров микроконтроллера STM32F767ZI

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер таймера | Энкодерный режим работы | Возможность работать в режиме ведущего/ведомого | Возможность захвата внешнего ШИМ | Количество внешних ШИМ каналов |
| 1 | + | + | + | 6 |
| 2 | + | + | + | 4 |
| 3 | + | + | + | 4 |
| 4 | + | + | + | 4 |
| 5 | + | + | + | 4 |
| 6 | - | - | - | 0 |
| 7 | - | - | - | 0 |
| 8 | + | + | + | 2 |
| 9 | - | - | + | 1 |
| 10 | - | - | - | 1 |
| 11 | - | - | - | 1 |
| 12 | - | - | - | 1 |
| 13 | - | - | - | 1 |
| 14 | - | - | - | 1 |

Как видно из таблицы 4, при использовании энкодерного метода для манипулятора, имеющего 6 степеней свободы, соответственно 6 шаговых двигателей необходимо будет задействовать все таймеры, имеющие внешние каналы, 1-5 и 8 для обработки энкодеров и 9-14 для генерации ШИМ сигнала. Что делает невозможным, так как необходимо также управлять захватным устройством.

Использование ведущих и ведомых таймеров невозможно, потому что только 6 таймеров обладают данной опцией, что дает возможность управления только тремя двигателями. Использование режима захвата приводит к тому же, что и энкодерный режим – необходимо задействовать все таймеры, имеющие внешние каналы.

## Интегральный метод вычисление положения

Вышеописанное приводит к необходимости использовать меньшее количество таймеров для отслеживания положения вала шагового двигателя. Предлагается применить один таймер, который по периодическому прерыванию будет вычислять текущее положение ротора двигателя путем дискретного интегрирования текущей скорости. Для реализации данного метода можно использовать один таймер, который даже может не иметь внешних выводов, что позволит значительно сократить использованную периферию. Схема алгоритма работы интегрального метода представлена на рисунке 11 [14].

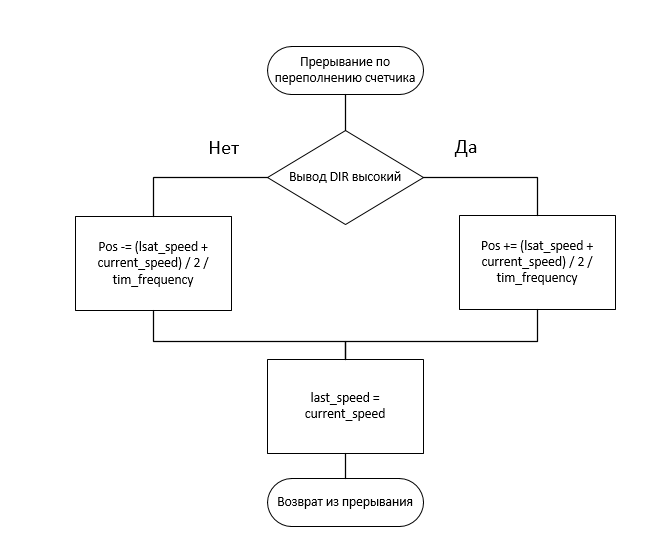


Рисунок 11 – Алгоритм расчета положения

На рисунке 11:

* Pos – позиция ротора;
* last\_speed – скорость на прошлом срабатывании прерывания;
* current\_speed – текущая скорость;
* tim\_frequency – частота таймера, использующегося для вычисления положения.

Вычисление положения ротора осуществляется по методу трапеций.

Точность определения положения ротора шагового двигателя интегрального метода зависит от частоты вызова интегрального прерывания, а также от характера изменения скорости. Для компенсации отклонений расчетных значений от реальных в конструкции рассматриваемого манипулятора присутствую концевые датчики.

Управление серводвигателями происходит путем задания скважности ШИМ сигнала. Период ШИМ для всех серводвигателей должен быть одинаковым, а скважность задает угол поворота вала двигателя. Таким образом, для управления серводвигателями используется один аппаратный таймер с двумя каналами, позволяющий задавать разную скважность на двух выводах, при одинаковом периоде сигнала.

Система управления расположена на микроконтроллере STM32F767ZI. Управляющие сигналы для шаговых двигателей задаются ШИМ сигналом и направлением вращения.

## Сравнение методов вычисления положения

В рамках проделанной работы был проведен эксперимент для сравнения трех методов определения положения ротора шагового двигателя. Во время эксперимента движение ротора двигателя имело равномерный и ускоренный характер, что позволяет оценить погрешность вычисления положения по интегральному методу. В рамках эксперимента драйвер двигателя настроен на 2000 микрошагов на оборот ротора, что соответствует количеству шагов энкодера, считываемых таймером микроконтроллера за один оборот. Из-за особенностей аппаратной обработки энкодеров на STM32 каждый импульс считается 2 раза, соответственно дискретизация d положения ротора, считанная с энкодера, также составляет 2 шага, или 0,36 градуса, что видно из формулы (58).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (58) |

Для оценки необходимой частоты срабатывания прерывания для вычисления положения по интегральному методу необходимо сравнить вычисленное значение положения ротора со значением, полученным путем обработки энекодеров, при разных частотах срабатывания прерывания.

Для оценки точности определения положения ротора на разных скоростных режимах, заданная скорость во время проведения эксперимента изменялась по закону синуса, так как исходя из общего решения обратной задачи кинематики для манипуляторов с шарнирными сочленениями при прямолинейном движении ЗУ скорость сочленения меняется также по закону синуса. Полученные в ходе эксперимента зависимости максимальной и медианной ошибки положения ротора от частоты срабатывания прерываний позволяют оценить необходимую частоту таймера, для генерации прерываний интегрального метода вычисления положения ротора шагового двигателя.

На рисунке 12 представлены график зависимости максимальной и медианной ошибок положения ротора от частоты срабатывания прерывания.

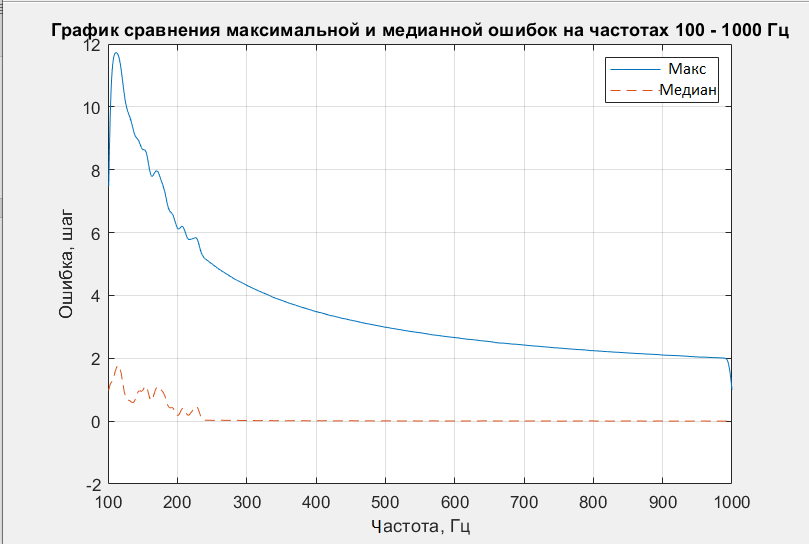


Рисунок 12 - Зависимость ошибок в диапазоне 100 – 1000 Гц

Как видно из рисунка 12 при частоте 100 Гц медианная ошибка падает ниже размера дискретизации положения, а при частоте около 1000 Гц максимальная ошибка положения ротора также падает ниже размера дискретизации. Из чего можно сделать вывод, что минимально необходимая частота срабатывания прерывания составляет 100 Гц, но при такой частоте необходимо применять фильтры сглаживания выбросов[15,16]. При использовании частоты в 1000 Гц полученные значения положения ротора будут максимально соответствовать реальным и необходимость в фильтрации пропадает.

Так же для оценки необходимой частоты срабатывания прерываний необходимо учесть время обработки одного прерывания, так как оно имеет наибольший приоритет, значит другие прерывания от других событий не смогут вступить в работу, до тех пор, пока не завершится интегральное прерывание. Также стоит учесть, что микроконтроллер с системой управления манипулятором на борте помимо вычисления положения должен выполнять большое число действий, таких как отправка и прием сообщений по UART и CAN, расчет целевых координат, предупреждение столкновений, изменение скорости вращения звеньев и так далее, что также требует задействовать ресурсы ядра микроконтроллера. Следовательно, если время обработки одного прерывания интегрального таймера будет велико, то для остальных задач у микроконтроллера не останется свободного вычислительного времени ядра. Согласно проведенным измерениям, время, необходимое на выполнение одного прерывания для интегрального таймера для расчёта положения четырех двигателей составляет 64 мкс, при системной частоте ядра равной 96 МГц. Значит при частоте прерывания 1000 Гц время, затрачиваемое на выполнения интегрального прерывания, составляет 6,4% от общего вычислительного времени микроконтроллера. При необходимости частоту срабатывания интегральных прерываний допустимо снижать с 300 Гц, тогда медианная ошибка останется близкой к нулю, а выбросы текущей ошибки положения ротора до 4х шагов необходимо фильтровать применяя фильтр высоких частот, так как исходя из результатов эксперимента значение ошибки положения ротора, при низких частотах срабатывания прерывания, имеют высокочастотных характер изменения, причем на частотах более 40 Гц частота резкого изменения ошибки положения ротора совпадает с частотой срабатывания интегрального прерывания.

## Вывод по разделу

Проведенное сравнение описанных методов реализации обратной связи по положению показывает возможность применение метода эмуляции обратной связи при невозможности подключения энкодеров шаговых двигателей непосредственно к микроконтроллеру.

# Планирование траектории

Для перемещения ЗУ из начальной точки в конечную за время *t* робототехнической системе необходимо согласованно изменять значения обобщенных координат звеньев. Для описания движения ЗУ в пространстве используются не только начальная и конечная точки, но и промежуточные точки. Такие точки выбираются в соответствии с доступной для конкретного МК дискретизацией. Так же для более подробного описания прибегают к построению зависимостей скоростей и ускорений звеньев. Для получения изменяющегося во времени положения ЗУ необходимо применить изменяющийся во времени вектор угол , вычисляемый по формуле 59 [17].

|  |  |
| --- | --- |
| *,* | (59) |

где – зависящее от времени решение ОЗК с начальным и конечным положением ЗУ.

В робототехнике применяется несколько методов построения вектора . Все методы построения траекторий можно разделить по пространственному признаку: методы, работающие в пространстве обобщенных координат, и методы, работающие в декартовом пространстве. На рисунке 13 приведена подробная схема разделения методов построения траекторий согласно [18]

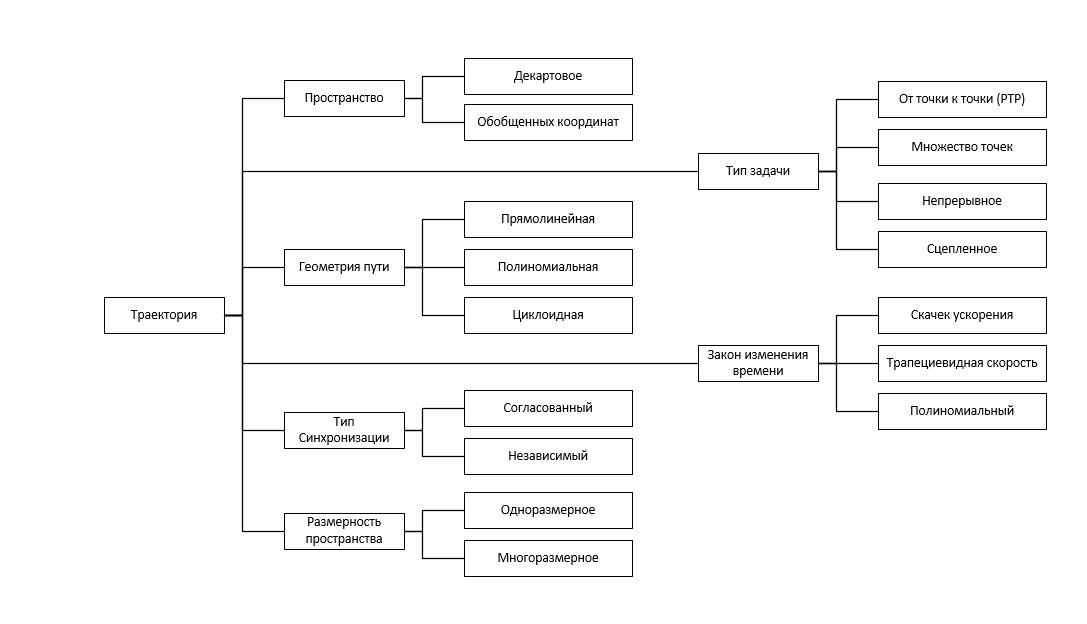


Рисунок 13 – Методы построения траекторий

Сосредоточив внимание на выборе рабочего пространства для построения траекторий. При работе в декартовом пространстве на каждом шаге управления необходимо решать ОЗК для каждой промежуточной точки. При этом в большинстве случаев используется прямолинейная геометрия пути. Это позволяет построить наиболее короткую траекторию между двумя точками. При отсутствии препятствий такая траектория представляет собой отрезок прямой. Когда же в рабочей зоне манипулятора присутствуют препятствия, то в декартовом пространстве их легко обрабатывать. При использовании декартового пространства интерполяция траектории предсказуема. Работа же в пространстве обобщенных координат позволяет значительно сократить количество расчёта ОЗК, так как при работе с данным пространством используют методы сглаживания траектории. Такие методы позволяют производить расчет ОЗК только в начальной и конечной точках пути. Так как начальная точка следующего пути, это конечная точка предыдущего, то для построения траектории необходимо сделать всего один расчет ОЗК, что значительно снижает затраты вычислительных ресурсов микроконтроллера. В таблице 5 приведено сравнение плюсов и минусов каждого пространства построения траекторий [19].

Таблица 5 - Сравнение пространств построения траекторий

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Декартовое пространство | Пространство обобщенных координат |
| Плюсы | Предсказуемое движение  Лучшая обработка препятствий и столкновений | Быстрое вычисление  Движение приводов плавнее и проще для проверки |
| Минусы | Медленное вычисление  Менее плавное движение привода | Промежуточные точки не гарантируют соблюдение ограничений или столкновений |

Для сглаживания траекторий применяются методы описания полиномом нечетных степеней, трапецией и Б-сплайном. Применение нечетных степеней позволяет получить нулевые значения производных на концах траекторий. Что необходимо для остановки ЗУ в заданной координате. В промышленных конвейерных системах производные декартовых координат приравниваются к скорости полотна конвейера, что позволяет синхронизировать положение ЗУ и объекта на конвейере [20].

Для стационарных систем на траекторию движения ЗУ накладываются следующие ограничения [7].

* фиксированные начальное и конечное положения ЗУ;
* нулевые начальная и конечная скорости;
* нулевые начальное и конечное ускорения;

## Описание траекторий методом трапеции

Трапециевидные траектории имеют два значительных минуса. Во-первых, в моменты перехода с фазы ускорения на фазу равномерного движения, или с фазы равномерного движения на фазу торможения происходит удар за счет резкого изменения скорости. Во-вторых, необходимо следить за достижением равномерного движения и в случае невозможности переходить на участок торможения. Трапециевидные траектории можно описать с помощью системы уравнений (60).

|  |  |
| --- | --- |
| *,* | (60) |

Соответственно вторая производная обобщенных координат представлена в формуле (61).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (61) |

где , – ускорения разгона и торможения;

– установившаяся скорость.

График скоростей приведен на рисунке 14.

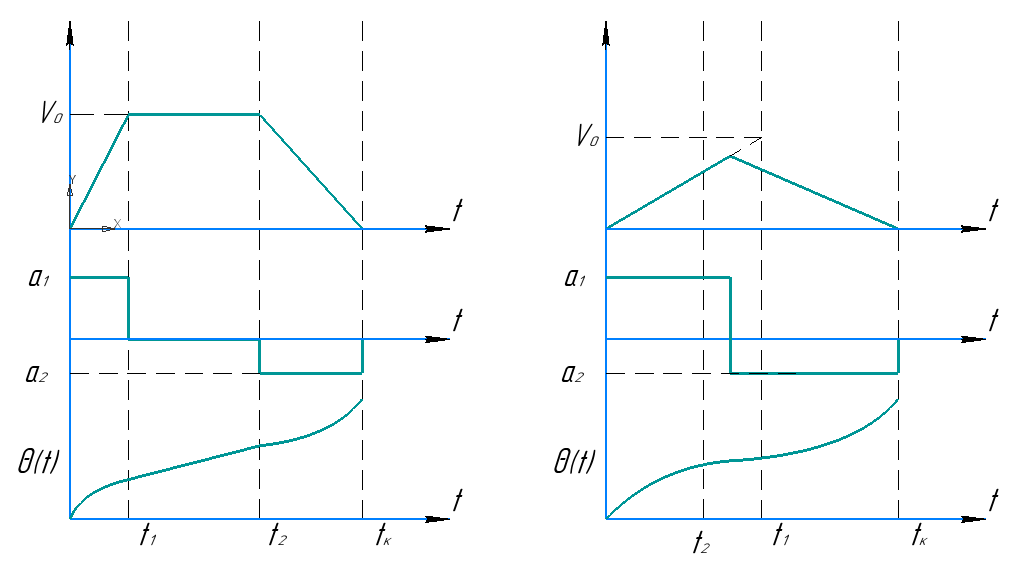


Рисунок 14 – метод трапеций

## Описание траекторий полиномом тертьей степени

Для сглаживания обобщенной скорости применяются полиномы третьей степени. Также полиномы 3-ей степени позволяют настроить первую производную на концах отрезка траектории. Согласно вышеописанным ограничением приведем описание траектории с использованием полинома 3-ей степени. Ограничения, накладываемые на траекторию, выражаются формулой (62).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (62) |

где – значение обобщенной координаты и ее скорости;

и – начально и конечное значения угловой координаты;

– время, необходимое для достижения заданного управления.

Эти ограничения однозначно определяют конкретным кубическим полиномом, представленным уравнениями (63).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (63) |

Используя полином, соединяющий начальное и конечное положение обобщенных координат, приведенный в формуле (63), можно сделать так что обобщенные скорости в начальный и конечный момент времени будут равны нулю. Построение траектории с помощью полинома обеспечивает плавный разгон и торможение звеньев. При увеличении степени описывающего полинома неизбежно увеличивается процессорное время, необходимое для вычисление обобщенных координат на каждом такте управления.

## Описание траекторий полиномом пятой степени

При использовании полинома 5-ой степени траектории звеньев представлен в формуле (64).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (64) |

Полином пятой степени позволяет ввести ограничение на ускорение в начальной и конечной точках. Таким образом, обеспечивается плавный старт и плавное торможение манипулятора. Ограничения приведены в системе (65).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (65) |

Тогда решая матричное уравнение (66) получим необходимые коэффициенты (67).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (66) |
|  | (67) |

В промышленной робототехнике, где необходимо брать какие-либо объекты с поверхности стола или конвейера на траекторию движения накладывают дополнительные ограничения [20]:

* конечная точка подъема должна находиться от опорной поверхности на расстоянии не менее 25% длины последнего звена робота.
* начальная точка спуска должна находиться от опорной поверхности на расстоянии не менее 25% длины последнего звена робота.

Для реализации такого рода ограничений применяется подход разбиения траекторий на участки подхода, отхода и перемещения засчет комбинации полиномов разных степеней в одной траектории. Так на участках подхода и отхода используются полиномы 4-й, а на участке равномерного движения полином 3-й степени. Полином 3-й степени настраивается исходя из значений производных на концах отрезка равномерного движения таким образом, чтобы такие производные совпадали с соответствующими значениями производных участков разгона и торможения.

Использование декартового пространства для построения траекторий применяется при непрерывном управлении, когда необходимо обеспечить не только статическую точность, но и динамическую. Такой вид управления применяется на роботах для дуговой сварки для обеспечения движения рабочего органа манипулятора по траектории сварного шва с заданной скоростью. Так же для обеспечения динамической точности применяются компенсаторы динамического запаздывания. При перемещении рабочего органа манипулятора между двумя точками в декартовом пространстве генерируются такие траектории звеньев , которые обеспечивают перемещение рабочего органа от начальной точки до конечной по прямой.

## Сравнение методов описания траектории

Проведя сравнение методов построения траектории в декартовом пространстве и в пространстве обобщенных координат [21,22]. Для сглаживания траекторий будем применять полиномы 3-й и 5-й степеней, а также метод трапеций. Дискретизация управления составляет 0,02 с. В качестве задания рабочему органу манипулятора необходимо посетить 3 точки и вернуться в начальное положение. Значение углов ориентации во всех точках равно 0. Сгенерированные траектории и целевые точки приедены на рисунке 16.

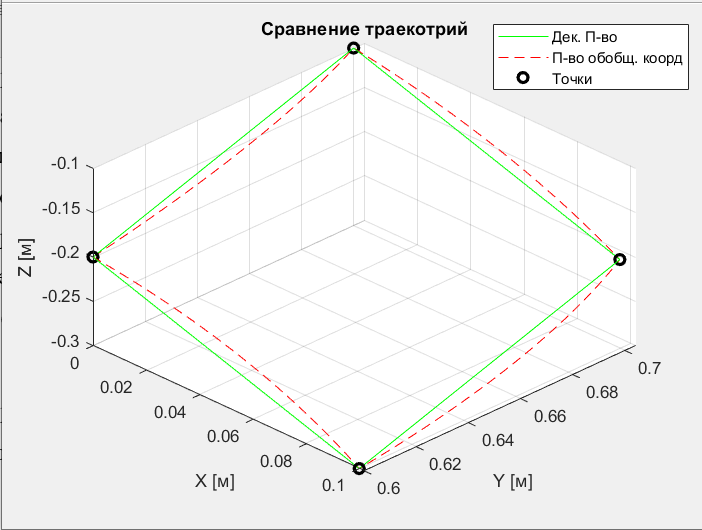


Рисунок 15 - Сравнение траекторий

Как видно из рисунка 15 траектория, построенная в декартовом пространстве, состоит из прямых линий, в отличии траектории в пространстве обобщенных координат. Для выполнения задания в декартовом пространстве манипулятору потребовалось 807 промежуточных точек дискретизации, в каждой из которых была решена ОЗК. Для выполнения того же задания в пространстве обобщенных координат ОЗК была решена всего 4 раза. Сравним изменения обобщенных координат во времени во время выполнения задания. График сравнения для четвертого сочленения представлен на рисунке 16. Графики для остальных звеньев приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Г.

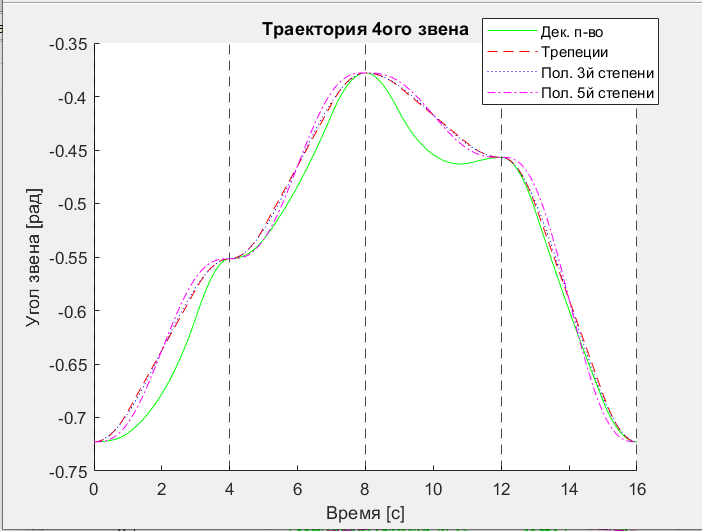


Рисунок 16 – Изменение угла 4ого звена во времени

Как видно их рисунка 16 характер изменения положения звена для декартового решения более резкий, чем для сглаженных решений.

На рисунках 17 и 18 приведены графики сравнения скоростей и ускорений для трех методом сглаживания траектории.

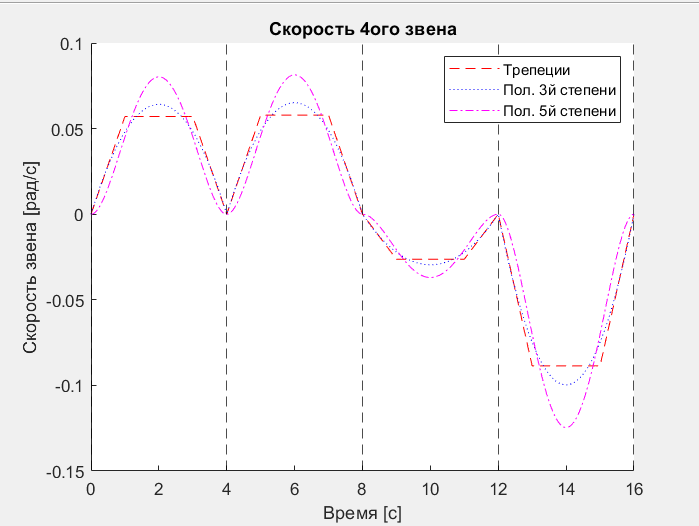


Рисунок 17 – Скорость 4ого звена

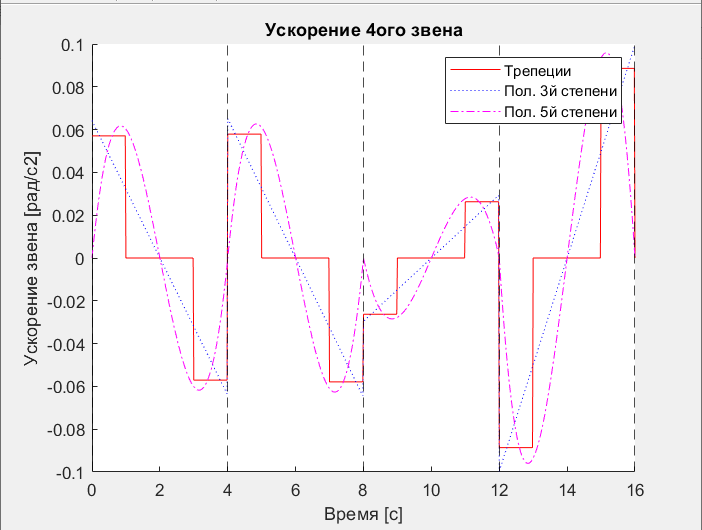


Рисунок 18 – Ускорение 4ого звена

Как видно из рисунка 17 скорость при использовании метода трапеций меняется рывками, что следует из законов самого метода. Достижение плавного изменения ускорения возможно только при использовании полиномов 5-ой степени. Из чего следует, что для минимизации динамических нагрузок на приводы и ремни необходимо использовать полином пятой степени. Графики скоростей и ускорений для остальных звеньев приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Д.

## Вывод по разделу

Описанные методы построения траекторий звеньев позволяют сделать выбор между ними в зависимости от задачи манипулятора. Так, для уменьшения вычислений следует выбирать метод трапеций, для плавности движений описание траектории полиномом пятой степени, а для следования по траектории и обработки столкновений со средой метод построения траектории с разбиением на точки в декартовом пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы проведено решение задач кинематики для рассматриваемого манипулятора с помощью формализма Денавита – Хартенберга и с помощью геометрического представления кинематических связей. Как показывает сравнение описанных методов для рассматриваемого манипулятора предпочтительнее использовать второе решение, так как необходимый расчет занимает меньше машинного времени. Приведённое в работе преобразование обобщенных координат манипулятора в координаты приводов является отличительной особенностью разрабатываемой системы управления, так как обобщенные координаты некоторых звеньев зависят не только от координат приводов этих звеньев, но и от обобщенных координат родительских звеньев.

Сравнение методов реализации обратной связи по положению для шаговых двигателей показывает, что описанный метод эмуляции обратной связи применим в случаях невозможности подключения энкодеров непосредственно к микроконтроллеру.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Balachandran W., Cecelja F., Ptasinski P. Collision-free path planning of a telerobotic manipulator based on swept volume of teleoperated manipulator. 2003. № October. P. 34–36.

2. Merat F. Introduction to robotics: Mechanics and control // IEEE J. Robot. Autom. 2009. Vol. 3, № 2. P. 166–166.

3. Bellicoso C.D. et al. Design, modeling and control of a 5-DoF light-weight robot arm for aerial manipulation // 2015 23rd Mediterr. Conf. Control Autom. MED 2015 - Conf. Proc. 2015. P. 853–858.

4. Wuthier D. et al. On the Design, Modeling and Control of a Novel Compact Aerial Manipulator // 24th Mediterr. Conf. Control Autom. MED 2016. 2016.

5. Chen C. et al. Kinematics analysis and trajectory planning of a multiarm medical robot assisted maxillofacial surgery // 2012 ICME Int. Conf. Complex Med. Eng. C. 2012 Proc. 2012. P. 229–234.

6. Guo D. et al. Efficient algorithms for the kinematics and path planning of manipulator // 2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, AICI 2009. 2009. Vol. 2. P. 282–287.

7. Шахинпур М. Курс робототехники. 1990. 152 p.

8. Incze I.I., Szabó C., Imecs M. Incremental encoder in electrical drives: Modeling and simulation // Stud. Comput. Intell. 2010. Vol. 313, № February. P. 287–300.

9. Incze I.I. et al. Incremental Encoder Based Position and Speed Identification: Modeling and Simulation // Acta Univ. Sapientiae Electr. Mech. Eng. 2010. Vol. 2. P. 27–39.

10. Incze J.J., Szabó C., Imecs M. Modeling and simulation of an incremental encoder used in electrical drives // 10th Int. Symp. Hungarian Res. Comput. Intell. Informatics, CINTI 2009. 2009. P. 97–109.

11. Francesco B. et al. A Simple and Accurate Algorithm for Speed Measurement in Electric Drives Using Incremental Encoder // Parco Area delle Sci. 2017.

12. Hong-Bin W. et al. Stepper motor SPWM subdivision control circuit design based on FPGA // Proc. - 16th IEEE/ACIS Int. Conf. Comput. Inf. Sci. ICIS 2017. 2017. P. 889–893.

13. Maaref M., Rezazadeh A. An implementable approach in order to model a nonideal incremental encoder in speed measurement studies // Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci. 2015. Vol. 23, № 5. P. 1489–1500.

14. Negrea C.A. et al. An improved speed identification method using incremental encoder in electric drives // 2012 IEEE Int. Conf. Autom. Qual. Testing, Robot. AQTR 2012 - Proc. 2012. P. 536–540.

15. Anuchin A. et al. Optimized method for speed estimation using incremental encoder // 19th International Symposium on Power Electronics, Ee 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. Vol. 2017-Decem. P. 1–5.

16. Anuchin A. et al. Method of Digital Filtering of Sine/cosine Incremental Position Encoder Signals for Elimination of DC Offset Impact // 2017 19th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2017 ECCE Eur. 2017. Vol. 2017-Janua. P. 1–7.

17. Eddine Choulak S. Trajectory planning and control for robot manipulations // Rev. Teledetect. 2009. Vol. 8, № 1. P. 17–34.

18. Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco L.V.& G.O. Modelling, planning and control. 2008.

19. Huang Q., Sugano S. Manipulator motion planning for stabilizing a mobile-manipulator // IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst. 1995. Vol. 3. P. 467–472.

20. Юревич Е.. И.. Управление робоами и робототехническими устройствами. Санкт-Петербург, 2000. 171 p.

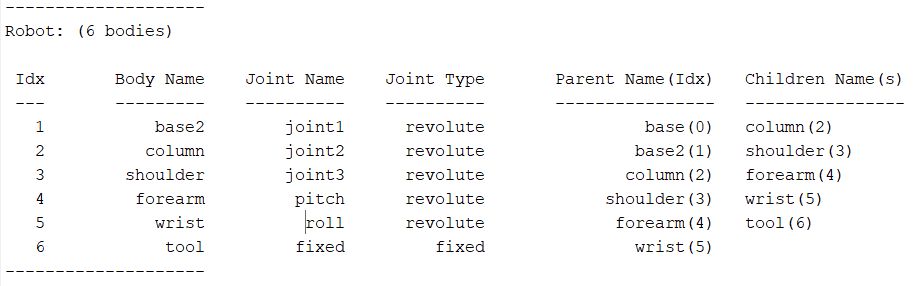
21. Wang X. et al. Kinematics and Trajectory Planning of a Supporting Medical Manipulator for Vascular Interventional Surgery. 2011. № C. P. 406–411.

22. Wei K., Ren B. A method on dynamic path planning for robotic manipulator autonomous obstacle avoidance based on an improved RRT algorithm // Sensors (Switzerland). 2018. Vol. 18, № 2.

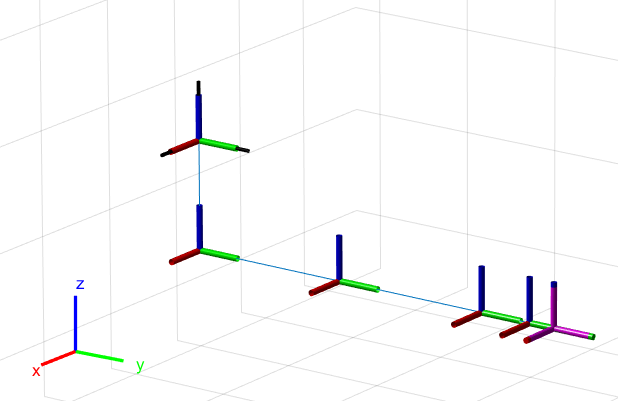
ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Модель манипулятора Robotic System Toolbox.**

Параметры модели манипулятора в Matlab Robotic System Toolbox



Так же на рисунке ниже приведена получившаяся модель.



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Функция в MATLab для проверки правильности расчета ОЗК.**

|  |  |
| --- | --- |
| 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16  17  18  19  20  21  22  23  24  25  26  27  28  29  30 | **function** [theta] = **IK**(x, y, z, r, p)  theta = [pi/**2** **0** **0** -pi/**2** **0** pi/**2**];  s = [**0** **0** **0** **0** **0**];  s(**5**) = r;  L = sqrt(x^**2** + y^**2**);  s(**1**) = atan2(x, y);  L23 = L - l4 \* cos(p);  H23 = z - l4 \* sin(p);  Q23 = sqrt(H23^**2** + L23^**2**);  alpha = acos((L23^**2** + Q23^**2** - H23^**2**)/(**2** \* L23 \* Q23));  betta = acos((Q23^**2** + l2^**2** - l3^**2**)/(**2** \* Q23 \* l2));  **if** H23 <= **0**  s(**2**) = -alpha - betta;  **else**  s(**2**) = -betta + alpha;  **end**  H34 = l2 \* sin(s(**2**)) - z;  L34 = L - l2 \* cos(s(**2**));  Q34 = sqrt(L34^**2** + H34^**2**);  psi = acos((l3^**2** + l4^**2** - Q34^**2**)/(**2** \* l3 \* l4));  s(**4**) = pi - psi;  gamma = acos((l2^**2** + l3^**2** - Q23^**2**)/(**2** \* l2 \* l3));  s(**3**) = pi - gamma;  theta(**1**) = s(**1**) + pi/**2**;  theta(**2**) = -s(**2**);  theta(**3**) = -s(**3**);  theta(**4**) = s(**4**) - pi / **2**;  theta(**5**) = s(**5**);  theta(**6**) = pi/**2**;  **end** |

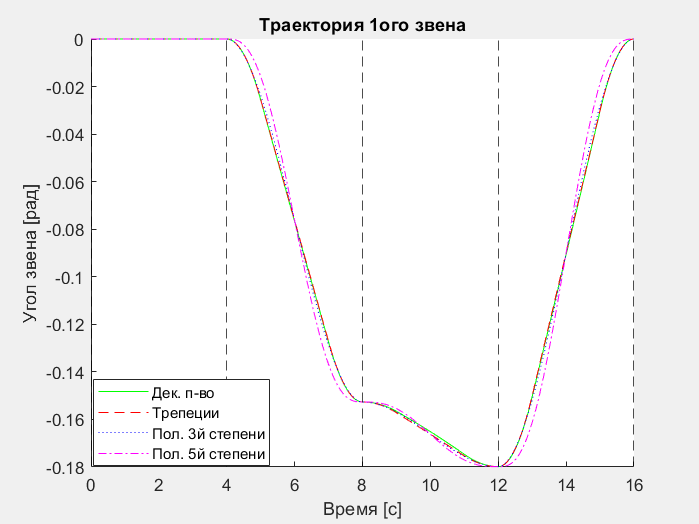
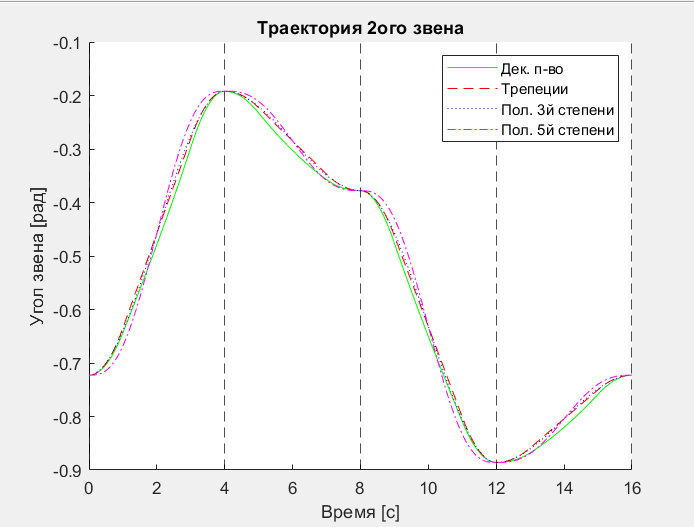
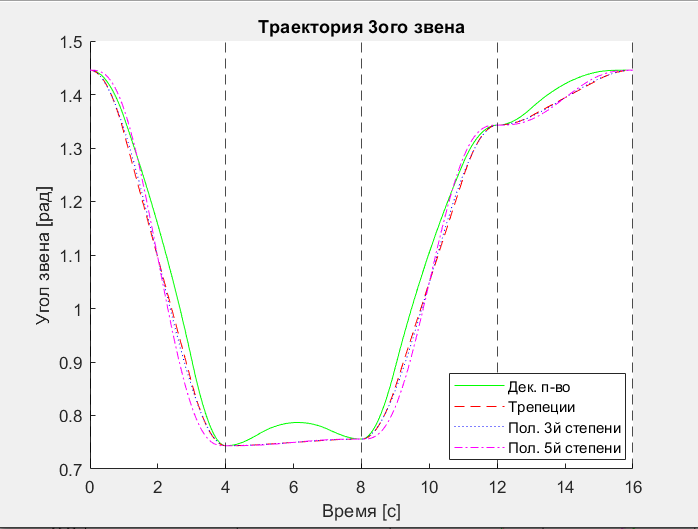
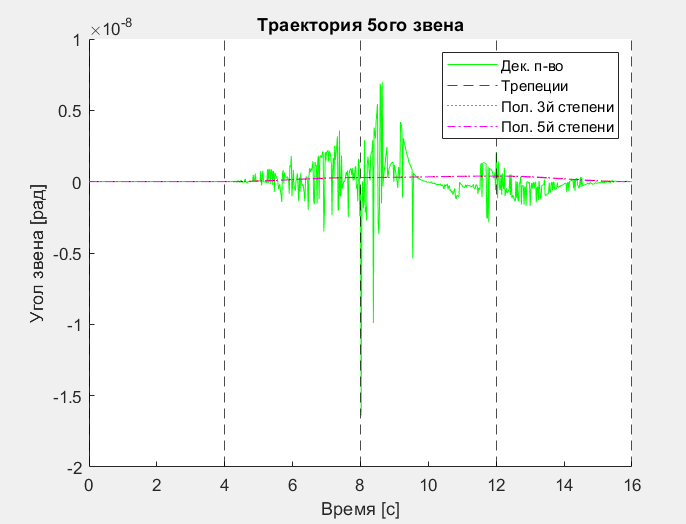
ПРИЛОЖЕНИЕ В

**Расчет ОЗК через формализм ДХ**

|  |  |
| --- | --- |
| 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16  17  18  19  20  21  22  23  24  25  26  27  28 | **float**\* **IKDH** (**float** x, **float** y, **float** z ,**float** p ,**float** r)  {  **float** s [**5**] = {**0**};  **float** nx = cos(s[**0**] \* cos(r) \* cos(p) - cos(s[**0**] \* sin(p)));  **float** ny = sin(s[**0**] \* cos(r) \* cos(p) + cos(s[**0**] \* sin(p)));  **float** nz = -sin(r) \* cos(p);  **float** ox = cos(s[**0**] \* cos(r) \* sin(p) - sin(s[**0**] \* cos(p)));  **float** oy = -sin(s[**0**] \* cos(r) \* sin(p) + cos(s[**0**] \* sin(p)));  **float** oz = sin(r) \* sin(p);  **float** ax = sin(r) \* cos(p);  **float** ay = sin(r) \* sin(p);  **float** az = cos(r);  **float** s234 = acos(-az);  s[**0**] = atan(-y / x);  **if** (s234 != **0**)  s[**4**] = atan(-oz / nz);  **else**  s[**4**] = s[**0**] - atan(ox / nx);  **int** al = -l1 - l4\*cos(s234) - **0** \* sin(s234) - z;  **int** b = cos(s[**0**]) \* x + sin(s[**0**]) \* y + l4 \* sin((s234)) - **0** \* cos(s234);  s[**2**] = acos((pow(al, **2**) + pow(b, **2**) - pow(l2, **2**) - pow(l3, **2**))/  (**2** \* l2 \* l3));  s[**1**] = atan((al \* (l3 \* sin(s[**2**])+ l2) - b \* l3 \* sin(s[**2**]))/  b \* (l3 \* cos(s[**3**]) + l2) + al \* l3 \* sin(s[**2**]));  s[**3**] = acos(-az) - s[**2**] - s[**1**];  **float** \*s2 = s;  **return** s2;  } |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

**Сравнительные графики положений**

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

**Сравнительные графики скоростей и ускорений**

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |