

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
Кафедра «Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.Н. Сочнев

подпись

« _____ » _____ 2019г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Проектирование робота-манипулятора

Руководитель

подпись, дата

должность, ученая степень

Ю.Г.Голых

Выпускник

подпись, дата

Ч.А.Бартан

Нормоконтролёр

подпись, дата

В.Н. Куликова

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра: «Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Сочнев А. Н.

подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме дипломного проекта

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		2

Студенту Бартану Чингису Айваровичу

Группа ФЭ15-08Б Направление (специальность) 15.03.06 (Мехатроника и робототехника)

Тема выпускной квалификационной работы «Проектирование робота-манипулятора».

Утверждена приказом по университету № 2264/с от 14.02.18

Руководитель ВКР Голых Ю.Г., канд. техн. наук., доц. каф. РиТК

Исходные данные для ВКР:

Параметры манипуляционного робота, контроллер Arduino Mega 2560.
Решаемая задача – проектирование робота-манипулятора. Среда программирования – MATLAB. Язык программирования – MATLAB и C++.

Перечень разделов ВКР.

Глава 1. Краткие сведения о манипуляционном роботе.

Глава 2. Описание трехзвенного манипуляционного робота.

Глава 3. Описание используемых компонентов.

Глава 4. Система управления трехзвенным роботом.

Глава 5. Управление манипуляционным роботом.

Глава 6. Разработка программного обеспечения.

Глава 7. Техничко-экономическое обоснование проекта.

Глава 8. Безопасность и экологичность проекта.

Глава 9. Дальнейшее развитие проекта.

Перечень графического материала.

Лист 1. Корпус нижней части робота.

Лист 2. Крышка для основания второй степени свободы.

Лист 3. Основание для второй степени свободы.

Лист 4. Основание для первой степени свободы.

Лист 5. Основание для пятой степени свободы.

Лист 6. Основание для четвертой степени свободы.

Лист 7. Основание для шестой степени свободы.

Лист 8. Первое звено.

Лист 9. Манипуляционный робот.

Лист 10. Рабочая зона.

Лист 11. Статический анализ.

Руководитель ВКР

Голых Ю.Г.

Задание принял к исполнению

Бартан Ч.А.

« ____ » _____ 2019 г.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Проектирование робота-манипулятора » содержит 113 страниц текстового документа, 13 приложений, 55 использованных источников, 11 листов графического материала.

МАНИПУЛЯЦИОННЫЙ РОБОТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СХВАТЫ РОБОТОВ, МАНИПУЛЯТОР, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, СИМПЛЕКСНЫЙ ПОИСК, МЕТОД ПОКООРДИНАТНОГО СПУСКА, ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА КИНЕМАТИКИ.

Объект дипломной работы: трёхзвенный манипуляционный робот с шестью степенями подвижности.

Цель: разработка трёхзвенного шестиосевого манипуляционного робота.

Задачи дипломного проекта.

1. Провести анализ существующих промышленных роботов.
2. Разработать конструкцию робота и исполнительного органа, кинематическую схему.
3. Подобрать комплектующие и реализовать.
4. Разработать алгоритмы управления роботом.
5. Создать управляющие команды и отправить их по беспроводной связи на контроллер манипуляционного робота.
6. Решить прямую и обратную задачу робототехники.
7. Проверить корректность работы и определить эффективность используемых методов.

Дипломная работа состоит из: введения, 9-ти глав, заключения, списка использованных источников и множества приложений и списка графического материала.

Во введении представлены основные параметры исследования.

В первой главе происходит ознакомление с классификацией данного робота, также приведены мировые производители промышленных роботов.

Во второй главе описывается проектирование трехзвенного робота с обоснованием в виде статического анализа в среде САПР КОМПАС-3D, его кинематическая структура, рабочая зона, а также проектирование схвата робота.

В третьей главе приводится описание всех комплектующих, необходимых для его функционирования, использующихся как внутри конструкции робота, так и вне него. Также осуществляется подбор материала для печати корпуса робота.

В четвертой главе представлена система управления роботом и виды.

Пятая глава даёт описание алгоритмов управления робота.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

В шестой главе подробно изложена структура разработанных программ, а также описаны результаты экспериментальной проверки их работы.

Седьмая глава даёт технико-экономическое обоснование дипломного проекта.

Восьмая глава посвящена вопросам безопасности и экологичности проекта.

Девятая глава предлагает способы улучшения работы манипуляционного робота

В заключении подводятся итог всего исследования.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 Краткие сведения о манипуляционном роботе	9
1.1 Классификация манипуляционного робота.....	9
1.2 Кинематическая структура робота	10
2 Описание трехзвенного манипуляционного робота.....	12
2.1 Проектирование трехзвенного манипуляционного робота	12
2.1.1 Конструкция манипуляционного робота.....	12
3 Описание используемых компонентов	19
3.1 Электроприводы.....	19
3.1.1 Виды приводов в робототехнике	19
3.1.2 Шаговые двигатели.....	19
3.1.3 Сервопривод	20
3.1.4 Отличие цифрового сервопривода от аналогового	21
3.1.5 Сервопривод MG996R	23
3.1.6 Сервопривод MG90S.....	24
3.3 Импульсный блок питания HP 19V 6.15 A.....	26
3.4 Понижающий преобразователь DC-DC Step-Down с регулировкой по току и напряжению	26
3.5 Arduino Mega 2560	27
3.6 16-битный ШИМ-контроллер для питания и управления сервоприводами на основе PCA9685	29
3.7 3D-принтер.....	31
3.7.1 Технологии печати 3D-принтеров.....	31
3.7.2 Тонкости работы с 3D-принтером.....	33
3.8 Выбор материалов для печати и их сравнение	34
4 Система управления трехзвенным роботом	37
4.1 Общая схема архитектуры	37
5 Управление манипуляционным роботом.....	39
5.1 Прямая задача кинематики. Представление Денавита-Хартенберга.....	39
5.2 Системы координат сочленений манипуляционного робота	40
5.3 Алгоритм 2.10.1."Формирование систем координат звеньев"	43
5.4 Обратная задача кинематики. Обзор алгоритмов решения обратной задачи.....	43
5.5 Проблема решения обратной задачи кинематики роботов.....	44
6 Разработка программного обеспечения	46
6.1 Общая структура программы для MATLAB	46
6.2 Функция решения прямой задачи.....	47
6.3 Функция решения обратной задачи	48
6.3.1 Функция решения методом по координатного спуска.....	48
6.3.2 Функция решения симплекс-методом	50
6.4 Общая структура программы для Arduino	51
7 Технико-экономическое обоснование проекта	53

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

7.1	Расчет затрат на оборудование и программное обеспечение.....	53
7.2	Затраты на электроэнергию.....	54
7.3	Затраты на амортизацию оборудования	55
7.4	Смета затрат.....	55
7.5	Выводы по разделу и способы экономии	56
8	Безопасность и экологичность проекта	58
8.1	Безопасность элементов манипуляционного робота.....	58
8.2	Безопасность исходных материалов	61
8.3	Безопасность органов управления.....	61
8.4	Безопасность средств защиты, входящих в конструкцию	62
8.5	Безопасность при монтажных и ремонтных работах	62
8.6	Безопасность при транспортировке и хранении	62
8.7	Безопасность при размещении.....	63
8.8	Требования безопасности к профессиональному отбору	63
8.9	Пожарная безопасность	63
8.10	Контроль выполнения требований безопасности.....	63
8.11	Безопасность при чрезвычайных ситуациях	63
8.12	Экологическая безопасность манипуляционного робота	64
8.13	Выводы по разделу.....	64
9.	Дальнейшее развитие проекта	65
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	67
	ПРИЛОЖЕНИЕ А "Описание регистров PCA9685"	72
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б "Достоинства, недостатки видов пластмассы"	74
	ПРИЛОЖЕНИЕ В "Растворимость/обработка, температурная нагрузка, температура плавления, применение и прочие свойства видов пластмассы"	76
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г "Параметры печати в слайсере Ultimaker Cura 3.6.0"	78
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д "Основной код программы MATLAB".....	87
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е "Функция forward_kinematics_for_6_axis_3_link "	91
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж "Функция inverse_kinematics_for_6_axis_3_link"	93
	ПРИЛОЖЕНИЕ И "Программа для решения методом покоординатного спуска"	95
	ПРИЛОЖЕНИЕ К "Целевая функция Q.m"	99
	ПРИЛОЖЕНИЕ Л "Функция lab8.m".....	101
	ПРИЛОЖЕНИЕ М "fogr.m – функциональные ограничения"	103
	ПРИЛОЖЕНИЕ Н "SimplexSearchBody.m - алгоритм симплексного поиска"	104
	ПРИЛОЖЕНИЕ О "CheckPosConstraints.m - нарушения позиционных ограничений"	107
	ПРИЛОЖЕНИЕ П "Программа управления степенями свободы"	108

ВВЕДЕНИЕ

С ростом потребностей производства в выпуске качественных изделий все более обусловлено широкое применение в промышленности средств автоматизации, в основе которых лежит разного рода вычислительная техника. Еще совсем недавно в основе большинства автоматизированных работ на производстве труд осуществлялся машинами (станками), сконструированными специально для определенных функций в производственном процессе. Они, как правило, были дороги и не обладали гибкостью при выполнении своих функций, т.е. использовались только для конкретных, заранее определенных задач[26].

В связи с этим все больший интерес проявляется к применению манипуляционных роботов, способных выполнять различного рода производственные задачи в обстановке гибкого производственного процесса при более низких материальных затратах.

Причины, по которым мною была выбрана именно эта тема для дипломного проекта следующие: во-первых, интересно понять принцип и устройство работы, заложенные в них, как с точки зрения математических методов, так и с точки зрения физики и электроники; во-вторых, чтобы самостоятельно уметь создавать робота.

Таким образом, актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью изучения классификаций промышленных роботов и, впоследствии, созданием своего, который используется в качестве опытной модели. Изучив его и применив алгоритмы управления, впоследствии, можно управлять более сложным и мощным устройством.

Практическая значимость данной работы заключается в том, что объект исследования может быть применен в опасной для человека среде, на производстве с целью удешевления продукции, а также лабораторного стенда в качестве наглядной модели при обучении студентов и школьников.

1 Краткие сведения о манипуляционном роботе

В данной главе будет дана классификация манипуляционного робота, представленного в выпускной работе, а также краткие сведения о манипуляционных роботах. Ниже дана сравнительная характеристика существующих типов промышленных роботов.




	Скорость	Точность	Степени свободы
	Высокая	Низкая	Средняя (4)
	Средняя	Высокая	Средняя (4)
	Низкая	Средняя	Высокая (6)

Рисунок 1.1 - Типы роботов и их кинематическая спецификация

Для исследования, ввиду своей высокой степени подвижности, был выбран тип «робот-манипулятор».

Манипулятор – это представитель машин-манипуляторов, предназначенный для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека, оснащённое рабочим органом и управляемое оператором или действующее автоматически.

1.1 Классификация манипуляционного робота

Исходя из свойств робота, классифицируем его по следующим признакам:

- по специализации – универсальный (если реализовать в «железе», то он способен выполнять различные основные (сборка, перемещение) и вспомогательные технологические операции (сварка)) ;
- по грузоподъемности – сверхлегкий (поднимаемый вес до 1 килограмма);
- по числу степеней подвижности – 6 степеней подвижности);
- по возможности передвижения – стационарный;
- по способу установки – напольный;
- по виду системы координат – угловая система координат;
- по виду привода – электромеханический (используется сервопривод);
- по виду управления – с программным управлением (без адаптации):
-с цикловым;

- с позиционным (движение осуществляется от точки к точке);
- с контурным (движение осуществляется по непрерывной траектории);
- по способу программирования – программирование аналитически (через ЭВМ)[1].

1.2 Кинематическая структура робота

Конструкция манипуляционного робота может быть обычно разделена на несколько структурных элементов, выполняющих различные функции и выполняющих различные виды движений: основание, корпус, механическая рука, захватное устройство (схват) [2]. Роль последнего в зависимости от потребностей производства выполняет: схват, если надо что-то перемещать, удерживать или собирать; сварочное оборудование – непосредственно для сварки изделий; присоска - для удержания или перемещения объекта. От основания до схвата робот состоит из звеньев, образующих *кинематическую цепь*. Два соседних звена составляют *кинематическую пару*. Расстояние звена от звена называется *длиной звена*. Расстояние от одной степени свободы до другой называется *звенным расстоянием* [3].

Ниже представлена кинематическая схема манипуляционного робота, представленного в данной работе. Здесь:

- L_1, L_2, L_3 – длины звеньев (рисунок 1.2);
- a_2, a_3, a_4 – длины звеньев (рисунок 1.3);
- $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ – углы поворотов (рисунки 1.2 и 1.3);
- d_1, d_6 – звенные расстояния (рисунок 1.3);

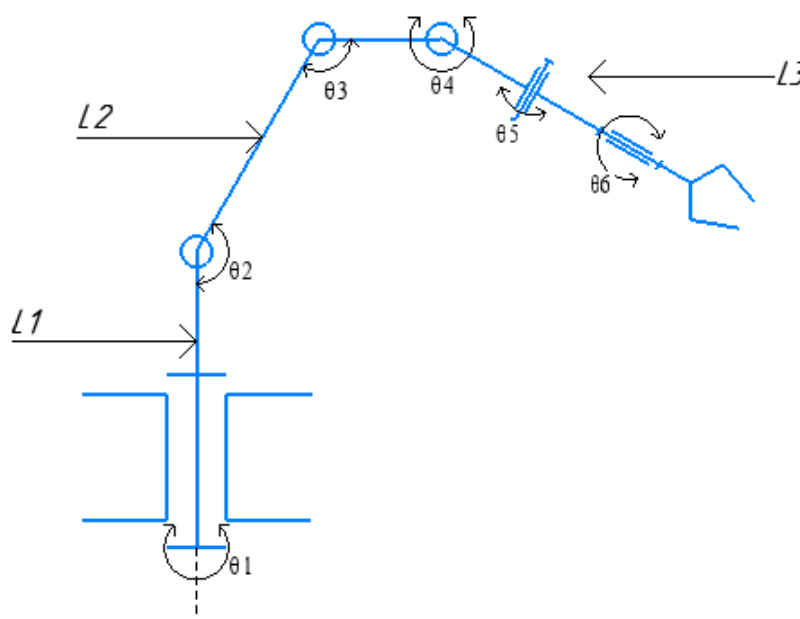


Рисунок 1.2 – Кинематическая схема манипуляционного робота

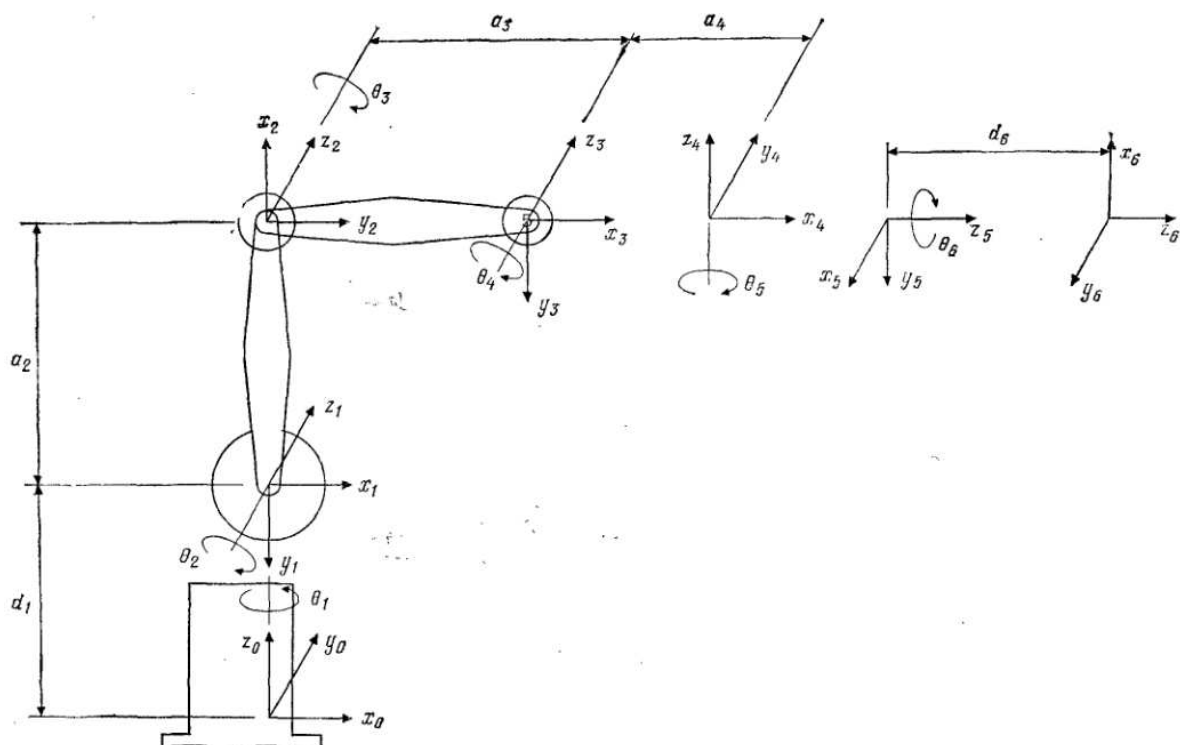


Рисунок 1.3 – Кинематическая структура манипуляционного робота

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР – 15.03.06 ПЗ

Лист

11

2 Описание трехзвенного манипуляционного робота

В данной главе описаны конструкции каждой из частей робота: основание, корпус, звенья робота, схват. Проектирование производилось в среде SolidWorks 2018 и КОМПАС-3D v2018.

2.1 Проектирование трехзвенного манипуляционного робота

Была взята самая распространенная кинематическая схема, встречающаяся в промышленных роботах-манипуляторах разных фирм-производителей. Степени свободы будут отличаться от тех, как показано на рисунке ниже.

An industrial robotic arm is shown below:

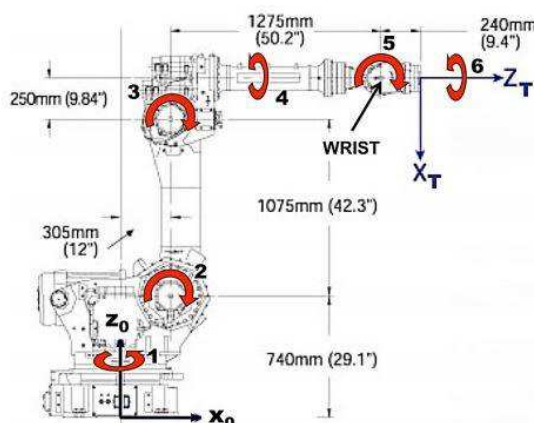


Рисунок 2.1 – Пример кинематической структуры 6-ти осевого робота на примере KUKA KR-16 и Меса 500

2.1.1 Конструкция манипуляционного робота

При конструировании деталей приходилось учитывать термоусадку пластика, так как она сказывалась на несоответствии компьютерных моделей и реальных. Поэтому детали пришлось перепечатывать по несколько раз. Также во избежание больших затрат был выработан следующий алгоритм действий:

- 1) провести измерения для будущей детали;
- 2) спроектировать деталь с учетом термоусадки;
- 3) распечатать деталь;
- 4) перейти к пункту 1.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Опытным путем, было выяснено, что термоусадка по горизонтали составляет 1мм для одной стенки (полная термоусадка зависит от количества деталей и стенок), а по вертикали – ее почти нет. В дальнейшем модели были спроектированы с ее учетом.

Ниже описан внешний вид деталей и отличающиеся параметры для их печати. Все остальные параметры техпроцесса, в целях повторения проекта, подробнее будут описаны в *приложениях*. Чертежи деталей можно найти в *приложениях*.

Для последующей печати деталей написание управляющей программы 3D-принтера производилось слайсером Cura в среде Ultimaker Cura v3.6.0.

Слайсер (slicer) - это программа, которая разбивает трехмерную модель на слои, тем самым подготавливая её к печати на 3D-принтере. Таким образом, слайсер из трехмерной модели (STL-файла) делает gcode-файл с конкретными командами для 3D-принтера, как печатать каждый слой[4].

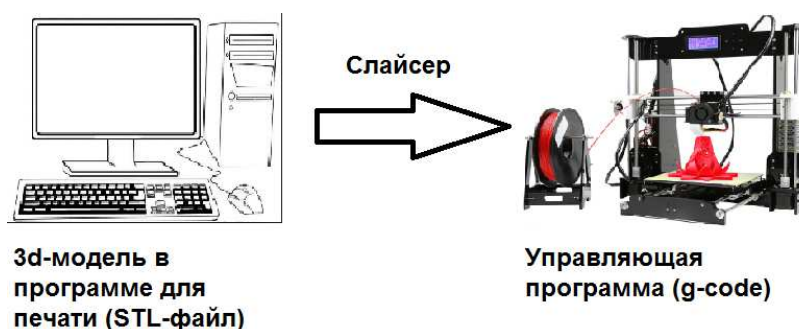


Рисунок 2.2 – Действия слайсера

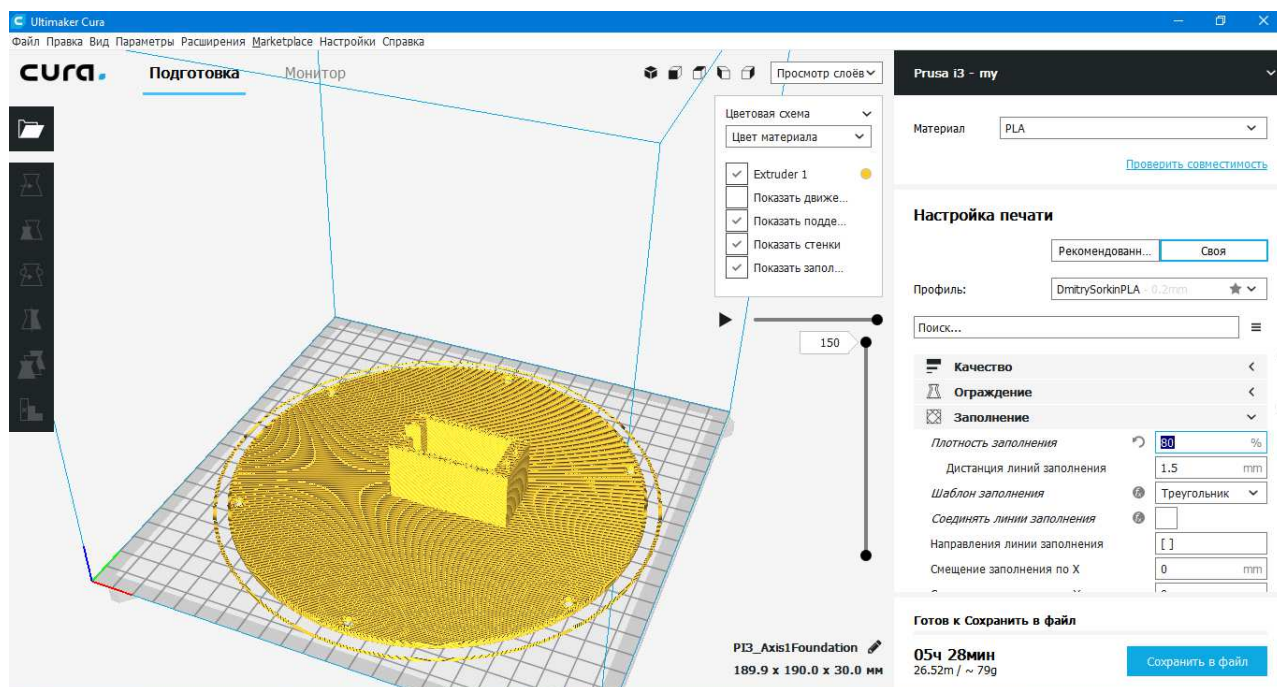


Рисунок 2.3 – Среда Ultimaker Cura v3.6.0

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

В среде можно выбрать плотность заполнения. Подбирается она с учетом экономии материала и прочности конструкции. Фигура заполнения – треугольник, т.к. она является простой, быстрой при печатании и отлично держит конструкцию.

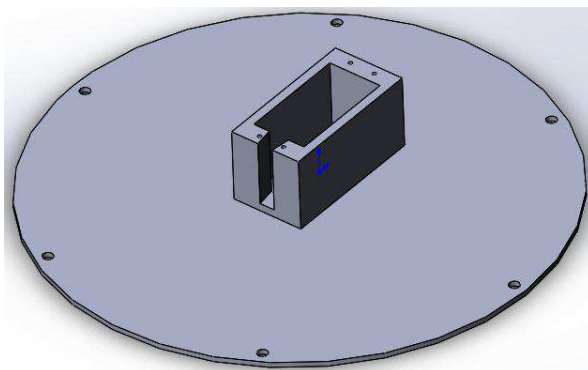


Рисунок 2.4 – Основание для первой степени свободы

Тип прилипания к столу – нет, т.к. основание – это самая широкая деталь.

Таблица 2.1 – Параметры печати и затраты

Характеристики	Значение
Плотность заполнения	80%
Тип прилипания к столу	нет
Время печати (часы)	~ 6 ч.
Кол-во пластика (г.)	79
Кол-во пластика (м.)	26.5

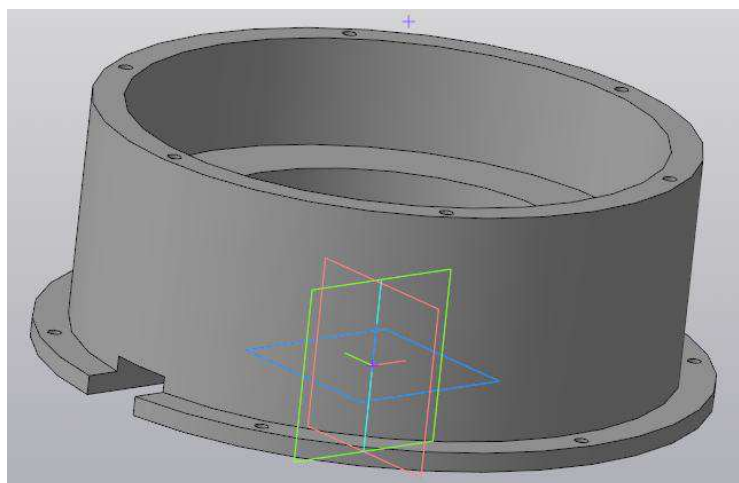


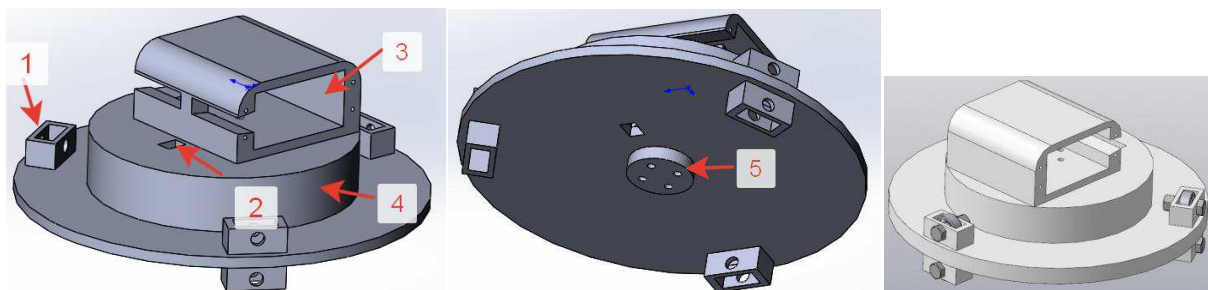
Рисунок 2.5 – Корпус нижней части робота

Было сделано отверстие для того, чтобы протянуть кабели питания и управления сервоприводов.

Корпус и основание должны иметь максимальную массу и, как следствие, плотность заполнения для наибольшей стабильности, но не во вред бюджету. Крепятся к доске из ДСП болтами М3.

Таблица 2.2 – Параметры печати и затраты

Характеристики	Значение
Плотность заполнения	50%
Тип прилипания к столу	нет
Время печати (часы)	~ 29 ч. (1.5 суток)
Кол-во пластика (г.)	433
Кол-во пластика (м.)	145.3



1 – шесть отверстий для подшипников 13x4x5, которые и будут уменьшать силу трения для разгрузки первой сервомашинки (внешний диаметр, внутренний диаметр и высота соответственно); 2 – отверстие для компоновки проводов сервоприводов; 3 – два отверстия сверху для вставки сервоприводов второй степени свободы; 4 – выступ, чтобы 2 степень свободы не ограничивалась; 5 – внизу были проделаны 4 круглых отверстия М3 для присоединения к сервоприводу для первой степени свободы.

Рисунок 2.6 – Основание для второй степени свободы

Таблица 2.3 – Параметры печати и затраты

Характеристики	Значение
Плотность заполнения	50%
Тип прилипания к столу	Юбка
Время печати (часы)	~ 14 ч.
Кол-во пластика (г.)	220
Кол-во пластика (м.)	73.4

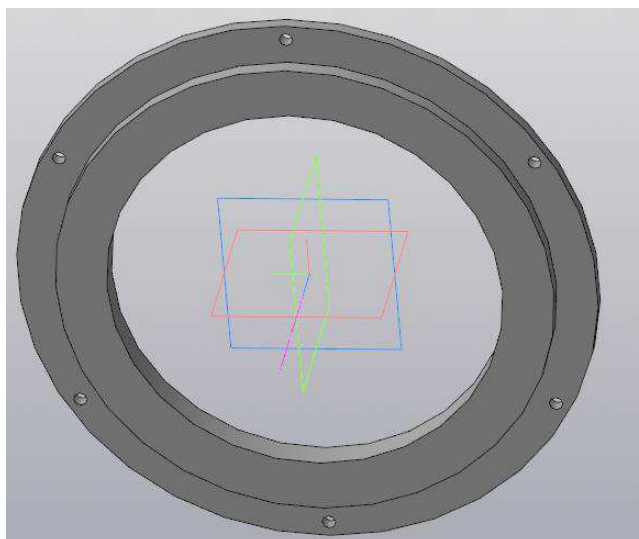


Рисунок 2.7 – Крышка для основания второй степени свободы

Крышка для основания второй степени свободы является верхней опорой для подшипников. Крепится на шести болтах М3.

Таблица 2.4 – Параметры печати и затраты

Характеристики	Значение
Плотность заполнения	50%
Тип прилипания к столу	нет
Время печати (часы)	~ 4 ч.
Кол-во пластика (г.)	49
Кол-во пластика (м.)	16.4

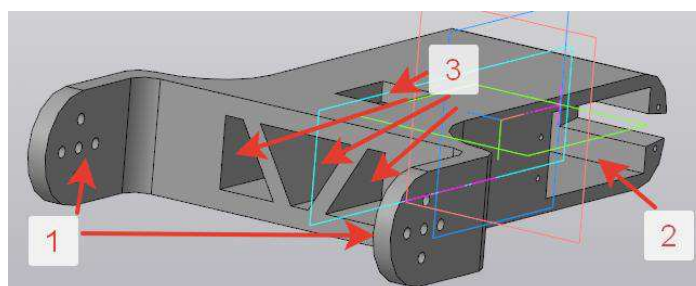


Рисунок 2.8 – Первое звено(основание для третьей степени свободы)

Были проделаны отверстия под винты М3 (1)– 10 штук, отверстия для сервоприводов MG996R (2) – 2 штуки и отверстия для кабелей (3) с ребрами жесткости.

Таблица 2.5 – Параметры печати и затраты

Характеристики	Значение
Плотность заполнения	50%
Тип прилипания к столу	Юбка
Время печати (часы)	~ 7 ч.
Кол-во пластика (г.)	95
Кол-во пластика (м.)	32

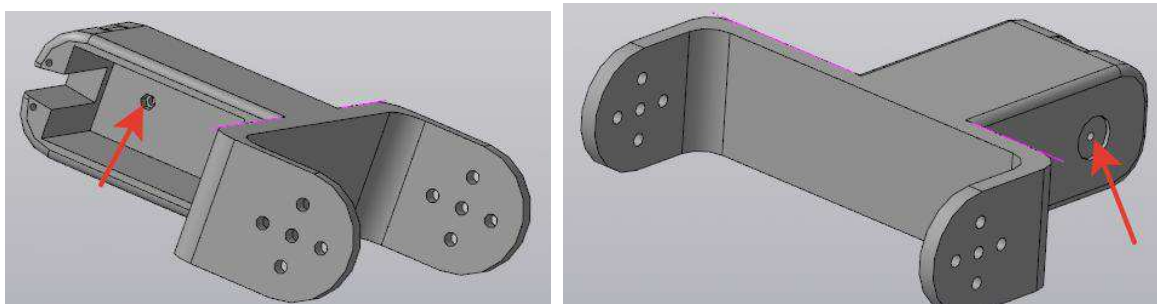


Рисунок 2.9 – Основание для четвертой степени свободы

Отверстие на рисунке 2.9 слева для шестигранника, а на рисунке справа – для зубчатого колеса.

Таблица 2.6 – Параметры печати и затраты

Характеристики	Значение
Плотность заполнения	50%
Тип прилипания к столу	Юбка
Время печати (часы)	~ 4 ч.
Кол-во пластика (г.)	44
Кол-во пластика (м.)	14.4

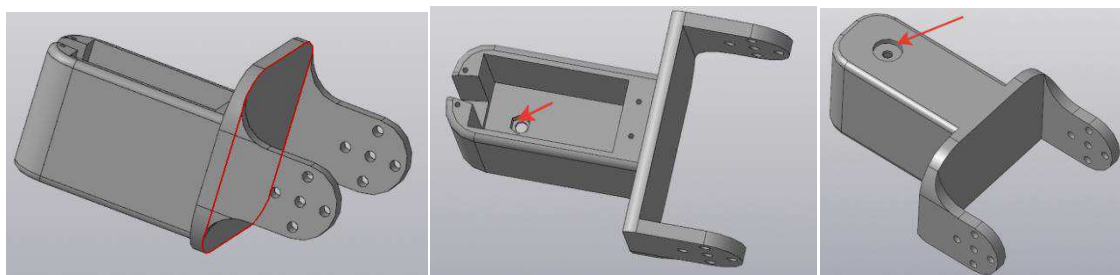


Рисунок 2.10 – Основание для пятой степени свободы

Таблица 2.7 – Параметры печати и затраты

Характеристики	Значение
Плотность заполнения	50%
Тип прилипания к столу	Юбка
Время печати (часы)	~ 4 ч.
Кол-во пластика (г.)	32
Кол-во пластика (м.)	10.6

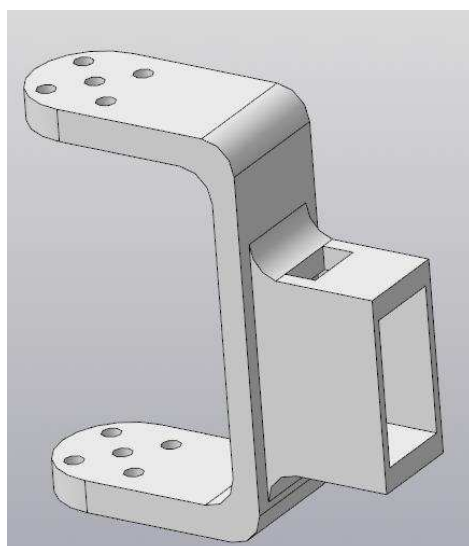


Рисунок 2.9 – Основание для шестой степени свободы

Таблица 2.8 – Параметры печати и затраты

Характеристики	Значение
Плотность заполнения	50%
Тип прилипания к столу	Юбка
Время печати (часы)	~ 2 ч.
Кол-во пластика (г.)	17
Кол-во пластика (м.)	5.7

3 Описание используемых компонентов

Для сборки робота потребуются разного рода компоненты. Поэтому для оптимизации выбора были выстроены критерии отбора исходя из технических и экономических характеристик.

3.1 Электроприводы

Электрические машины преобразуют механическую энергию в электрическую и наоборот, электрическую энергию в механическую. Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется двигателями.

Отличие двигателя от привода состоит в том, что во втором помимо мотора стоит еще и устройство управления. Ниже будут описаны виды приводов, их достоинства и недостатки.

3.1.1 Виды приводов в робототехнике

При конструировании манипуляционного робота потребуется электропривод, отвечающий следующим свойствам:

- высокая точность позиционирования;
- высокая мощность;
- стабильность работы;
- наличие обратной связи;
- низкая цена.

Исходя из этого, в робототехнике, применяются 2 вида двигателей, описанные ниже[5].

3.1.2 Шаговые двигатели

Шаговые двигатели — это электромеханические устройства, преобразующие сигнал управления в угловое (или линейное) перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении без устройств обратной связи. По сути шаговый двигатель является синхронным, но отличается подходом управления[6].

Достоинства:

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

- главное преимущество – точность работы. При подаче потенциалов на обмотки двигатель повернется строго на определенный угол;
- низкая стоимость;
- подходит для автоматизации отдельных механизмов и систем, где нет необходимости в высокой динамике.

Недостатки:

- присутствует проблема «проскальзывания» ротора при повышенной нагрузке на вал;
- ограничение шагов (максимум 1000 об/мин);
- отсутствие обратной связи[7,8].

3.1.3 Сервопривод

Сервопривод (он же «следающий привод») — механический привод, синхронный, асинхронный либо любой другой, с отрицательной обратной связью по положению, моменту и другим параметрам, позволяющим точно управлять параметрами движения.

Достоинства:

- более высокая скорость вращения;
- высокая мощность;
- обратная связь, благодаря которой поддерживается точность позиционирования на высоких скоростях и высоких моментах;
- точность позиционирования;
- низкоинерционность и высокие динамические характеристики.

Недостатки:

- сложная система подключения и управления;
- требует квалифицированного обслуживания;
- высокая стоимость.

Для понижения скорости используется редуктор: механизм из шестерней, передающий и преобразующий крутящий момент.



Рисунок 3.1 – Устройство сервопривода

Включая и выключая электродвигатель, можно вращать выходной вал – конечную шестерню сервопривода, к которой можно прикрепить рабочий орган либо звено робота. Однако, для того чтобы положение контролировалось устройством, необходим датчик обратной связи – энкодер, который будет преобразовывать угол поворота обратно в электрический сигнал. Для этого часто используется потенциометр. При повороте бегунка потенциометра происходит изменение его сопротивления, пропорциональное углу поворота. Таким образом, с его помощью можно установить текущее положение механизма.



Рисунок 3.2 – Обратная связь в сервоприводе

Кроме электродвигателя, редуктора и потенциометра в сервоприводе имеется электронная часть (преобразователь частоты \ сервоусилитель \ инвертор \ servodrive), которая отвечает за приём внешнего параметра, считывание значений с потенциометра, их сравнение и включение/выключение мотора. Она-то и отвечает за поддержание отрицательной обратной связи.

Величина шага перемещения определяется разрешающей способностью датчика обратной связи, энкодера, а так же блоком управления. Стандартные сервоприводы могут обеспечить шаг в $0,036^\circ$ т. е. $1/10\,000$ от оборота, и это на скоростях до 5 000 об/мин. Самые современные сервоприводы отрабатывают шаг в $1/2\,500\,000$ [6,7,8,9].

3.1.4 Отличие цифрового сервопривода от аналогового

Как таковых внешних отличий между цифровыми и аналоговыми сервоприводами нет, то есть могут использоваться те же двигатели, шестерни, потенциометры, кроме электронной части, а именно:

- аналоговый сервопривод имеет в своем составе чип логики и компоненты задающие временные отрезки;

- в цифровом сервоприводе установлен микропроцессор с кварцевым генератором, который принимает импульсы, анализирует их и управляет мотором.

Таким образом, в физическом исполнении отличие лишь в способе обработки импульсов и управлении мотором[10].

Преимущества цифрового сервопривода перед аналоговым:

На некоторых цифровых сервоприводах доступна прошивка управляющего процессора. Этим можно добиться изменения производительности сервопривода.

Оба типа сервопривода принимают одинаковые управляющие импульсы. После этого аналоговый сервопривод принимает решение, надо ли изменять положение, и в случае необходимости посылает сигнал на мотор. Происходит это обычно с частотой 50 Гц. Таким образом получаем 20 мс — минимальное время реакции. В это время любое внешнее воздействие способно изменить положение сервопривода. Но это не единственная проблема. В состоянии покоя на электромотор не подаётся напряжение, в случае небольшого отклонения от равновесия на электромотор подаётся короткий сигнал малой мощности. Чем больше отклонение, тем мощнее сигнал. Таким образом, при малых отклонениях сервопривод не сможет быстро вращать мотор или развивать большой момент. Образуются «мёртвые зоны» по времени и расстоянию.

Эти проблемы можно решать за счёт увеличения частоты приёма, обработки сигнала и управления электромотором. Цифровые сервоприводы используют специальный процессор, который получает управляющие импульсы, обрабатывает их и посылает сигналы на мотор с частотой 200 Гц и более. Получается, что цифровой сервопривод способен быстрее реагировать на внешние воздействия, быстрее развивать необходимые скорость и крутящий момент, а значит, лучше удерживать заданную позицию, что хорошо. Более наглядно данную информацию можно увидеть на следующих диаграммах:

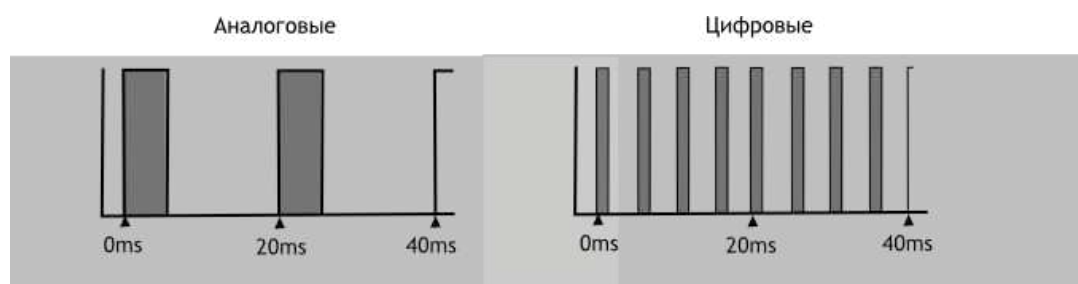


Рисунок 3.3 – Преимущество цифрового сервопривода перед аналоговым

На практике это означает, что на коротких промежутках времени, подаваемое напряжение на цифровой сервопривод будет возрастать быстрее, а вместе с этим увеличивается и скорость поворота выходного вала, крутящий момент и сервопривод позиционируется точнее.

Недостатки цифрового сервопривода:

Так как импульсы посылаются чаще, то и потребление у таких сервоприводов выше. Также цифровые сервоприводы сложнее в производстве, а потому стоят заметно дороже.

Подведем итог. Цифровой сервопривод более подходит для использования, если вам необходимо:

- более высокое разрешение - меньше мертвая зона, более точное позиционирование;
- более быстрая реакция управления - увеличение ускорения на коротких промежутках времени;
- постоянный крутящий момент на всем пути движения качалки сервопривода;
- повышение момента удержания, когда качалка позиционируется в неподвижном положении.

Для всего остального отлично подойдут и аналоговые серводвигатели[11].

3.1.5 Сервопривод MG996R

Исходя из требуемых параметров, а именно из того, что сервопривод должен иметь: максимальный крутящий момент, точность позиционирования, минимальные размеры, массу и потребляемый ток, иметь металлический редуктор для большей прочности и стабильности позиционирования, быть доступным для возможной замены, экономически-эффективным – таким образом, выбор пал на известный цифровой сервопривод MG996R.



Рисунок 3.4 – Внешний вид сервопривода MG996R

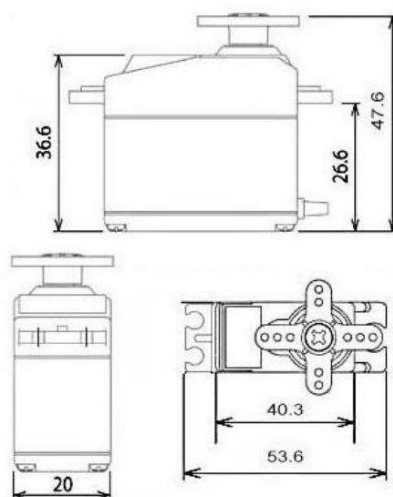


Рисунок 3.5 – Размеры сервопривода MG996R

Таблица 3.1 – Характеристики сервопривода MG996R

Характеристики	Значение
Рабочее напряжение	4.8-7.2В
Материал редуктора	Металлический
Масса	55 гр.
Номинальный потребляемый ток	500 – 900 мА
Пусковой ток	До 2.5А
Скорость вращения (при 6В)	60°/0.14s
Крутящий момент (при 4.8В)	9.4 кг·см
Крутящий момент (при 6В)	11 кг·см

Исходя из всех параметров, сервоприводы будут применяться для первых пяти степеней свободы. Также надо подбирать сервопривод с учетом синхронности их скоростей, чтобы уменьшить нагрузку на привод в начале движения.

3.1.6 Сервопривод MG90S

Для дальнейших степеней свободы будет использоваться сервопривод меньших размеров MG90S. Его устройство работы такое же как и у сервопривода MG996R.



Рисунок 3.6 – Внешний вид сервопривода MG90S

Таблица 3.2 – Характеристики сервопривода MG90S

Характеристики	Значение
Рабочее напряжение	4.8-6В
Материал редуктора	Металлический
Масса	13.4 гр.
Номинальный потребляемый ток	12 – 100 мА
Пусковой ток	До 1А
Скорость вращения (при 6В)	60°/0.08s
Крутящий момент (при 4.8В)	1.8 кг·см
Крутящий момент (при 6В)	2.2 кг·см

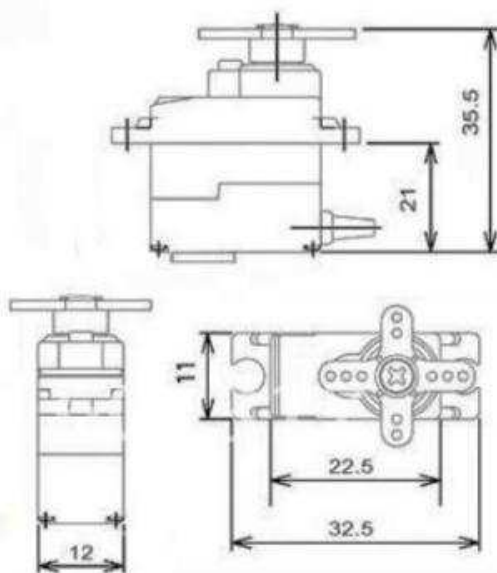


Рисунок 3.7 – Размеры сервопривода MG90S

3.3 Блок питания HP-HSTNN-DA25, 19V 6.15 A

Для поддержания работы всей электроники и приводов потребуется источник питания. Для этого хорошо подойдет блок питания на 19.5V, 6.15A.



Рисунок 3.8 – Блок питания HP-HSTNN-DA25

Таблица 3.3 – Характеристики блока питания HP-HSTNN-DA25

Характеристики	Значение
Входное напряжение и ток	AC (переменный) 100-240V, ~ 2.2A
Выходное напряжение и ток	DC (постоянный) 19.5V, 6.15A
Максимальная мощность	120W

3.4 Понижающий преобразователь DC-DC Step-Down с регулировкой по току и напряжению

Так как электроника и сервоприводы питаются, как правило, от 5 В, а блок питания выдает 19.5 В, то потребуется преобразовать ток из одного значения в другое. Для этого и понадобится понижающий «Step-Down» преобразователь.

DC-DC преобразователь – это электронная схема или модуль, выполненный на силовых ключах и трансформаторе и предназначенный для повышения/понижения выходного напряжения. Выпускаются в виде

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

законченного устройства/модуля. Наличие трансформатора позволяет реализовать гальваническую развязку входа и выхода DC/DC преобразователя.

Топология buck является понижающей, то есть позволяет построить понижающий преобразователь напряжения. Напряжение на выходе buck-преобразователя практически линейно зависит от напряжения на входе.[12]

Исходя из того, что надо регулировать не только напряжение, но и ток, выбор пал на DC-DC Step-Down преобразователь XL4016.

Таблица 3.4 – Характеристики понижающего преобразователя XL4016

Характеристики	Значение
Топология	Buck (понижающий)
Входное напряжение	DC (постоянный) 5V-40V
Выходное напряжение	DC (постоянный) 1.25V-32V (настраивается)
Выходной ток	до 0.3-10A (настраивается, свыше 8 ампер необходим обдув)
Максимальная мощность	до 100W (без обдува), до 150 ватт (с обдувом)
КПД	до 96%
Размеры	65x56x23 мм

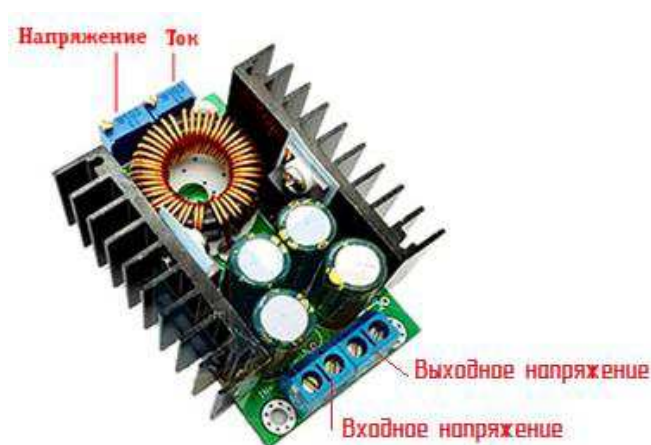


Рисунок 3.9 – Понижающий преобразователь XL4016

3.5 Arduino Mega 2560

Arduino Mega построена на микроконтроллере ATmega2560. Имеет следующие характеристики [28]:

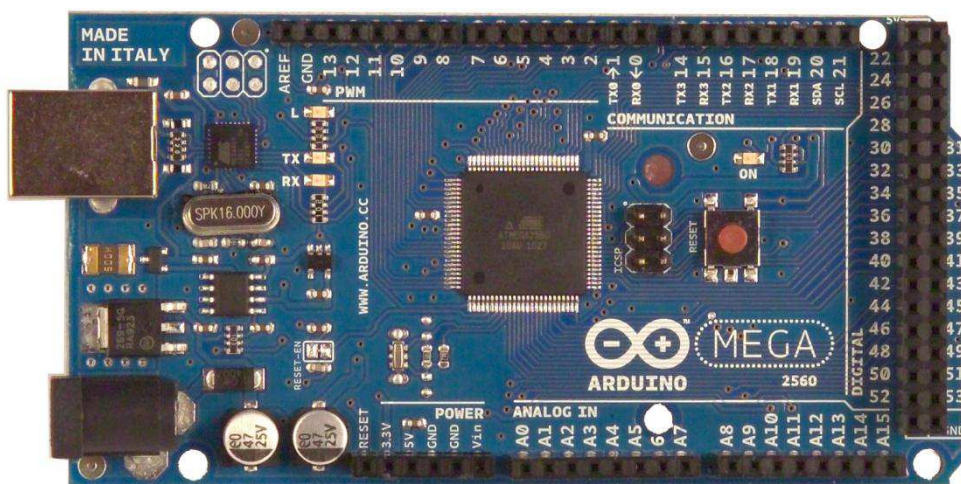


Рисунок 3.10 – Arduino Mega 2560

Таблица 3.5 – Характеристики Arduino Mega 2560

Характеристики	Значение
Микроконтроллер	ATMega 2560
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (предельное)	6-20В
Цифровые Входы/Выходы	54 (14 из которых могут работать также как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	16
Постоянный ток через вход/выход	40 mA
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 mA
Флеш-память	256 КВ (из которых 8 КВ используются для загрузчика)
ОЗУ	8 КВ
Энергонезависимая память	4 КВ
Тактовая частота	16 MHz

3.6 16-битный ШИМ-контроллер для питания и управления сервоприводами на основе PCA9685

PCA9685 — это 16-ти каналный 12-разрядный контроллер с настраиваемой частотой ШИМ-а в пределах от 24 до 1526 Гц. С помощью ШИМ контроллера можно управлять яркостью светодиодов, сервоприводами, и другими устройствами, где в качестве управляющего сигнала применяется ШИМ сигнал.

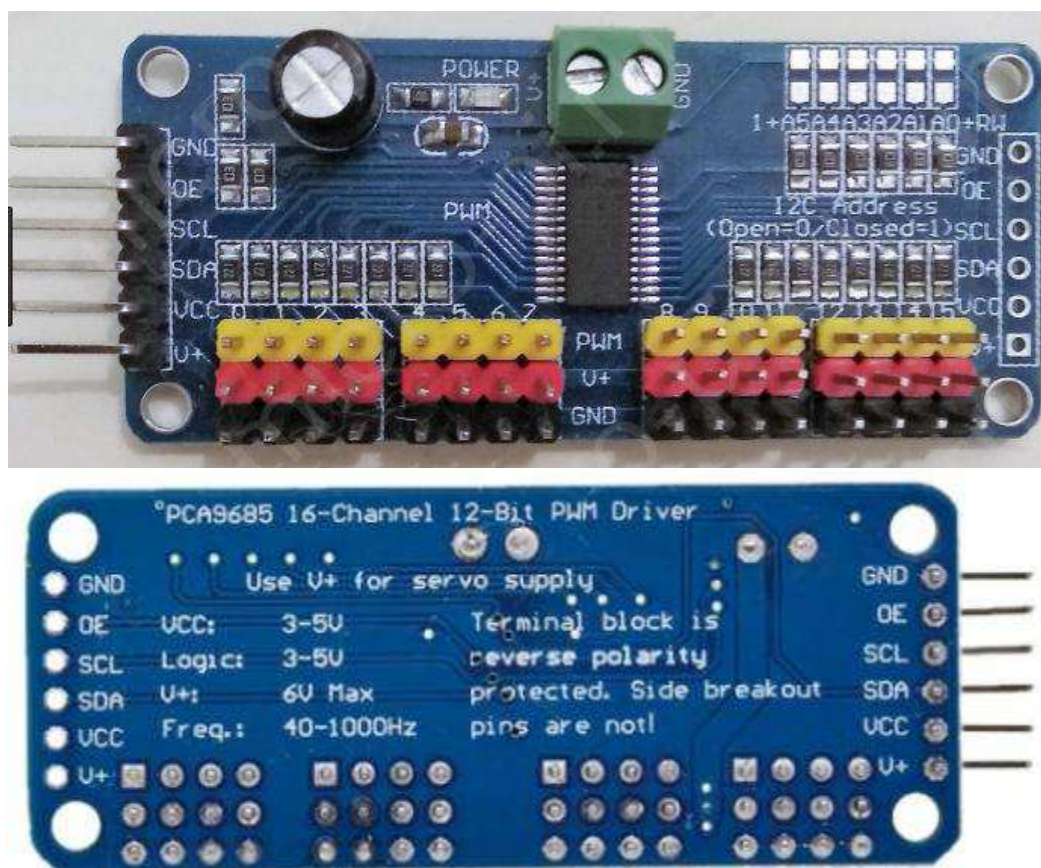


Рисунок 3.11 – 16-битный ШИМ-контроллер на основе PCA9685

Для управления PCA9685 используется шина I2C, на этой плате есть две группы разъемов для шины I2C с двух сторон. Это позволяет подключать на одной шине несколько плат последовательно или подключать другие I2C устройства.

На плате есть переключки, с помощью которых можно установить адрес устройства отличный от стандартного. Поэтому если 16 каналов Вам мало можно последовательно включить несколько таких плат, установив переключками на каждой свой адрес. Конструкция позволяет каскадирование и управление 992 сервоприводами или 62 платами.

Питание контроллера и выходов ШИМ каналов разделено и может быть от 3 до 5 вольт. Для ШИМ каналов допускается максимальное напряжение 6 Вольт. Питание для ШИМ каналов можно подавать на штырьки (V+) или через клему. На плате есть фильтрующий конденсатор — это помогает при больших нагрузках, когда питание может быть не стабильным, что может отрицательно сказываться на работе управляемых устройств.

Таблица 3.6 – Характеристики PCA9685

Характеристики	Значение
Питание модуля	3.3 или 5 В оба напряжения входят в диапазон допустимых
Питание чипа (VCC):	2.3 ... 5.5 В постоянного тока
Сбой питания (VPOR):	до 2.0 В константа используемая компаратором (номинально 1,7в)
Потребляемый ток в рабочем режиме	до 10 мА (номинально 6мА);
Потребляемый ток режиме ожидания	до 15.5 мкА в режиме ожидания (номинально 2,2мкА)
Ток нагрузки на выходах при VCC = 5В и выходом с открытым стоком (флаг OUTDRV=0)	до 25 мА
Ток нагрузки на выходах при VCC = 5В и каскадным выходом чипа (флаг OUTDRV=1)	до 10 мА
Частота тактирования	25 МГц внутренний генератор ($\pm 3\%$);
Внешний источник тактирования	от 0 до 50 МГц
Количество каналов ШИМ	16 шт. с поддержкой «горячего» подключения устройств к выходам
Разрешение ШИМ	12 бит 4096 тактов (рабочий цикл от 0 до 100%)
Выходная частота ШИМ	от 24 до 1526 Гц для внутреннего генератора 25 МГц (зависит от частоты тактирования и значения делителя)
Рабочая частота шины I2C	до 1 МГц с поддержкой 100кГц, 400кГц, 1МГц (ёмкость до 4000пФ);
Уровень «0» на шине I2C	от -0.5 до 0.3 VCC В
Уровень «1» на шине I2C	до 0.7 VCC до VCC+0.3 В
Рабочая температура	от -40 до 85 °C

Китайские реплики могут отличаться отсутствием цепи защиты от обратного тока в виде полевого транзистора AOD417[14]. Принципиальная схема в приложении А.

Таблица 3.7 – Распиновка модуля на PCA9685

Вывод	Описание
GND	общий (минус питания)
OE	разрешение работы выходов модуля
SCL	линия тактирования (интерфейс I2C)

Продолжение таблицы 3.7

SDA	линия данных (интерфейс I2C)
VCC	плюс питания чипа
V+	плюс питания периферии
PWM	выходы ШИМ (шиотно-импульсная модуляция)
A0...A5	состояния 0...5 битов адреса чипа на шине I2C

3.7 3D-принтер

3D-печать или «аддитивное производство» – процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. 3D-печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели.

3D-принтерами называют станки с программным управлением, выполняющие построение детали аддитивным способом. Определим критерии, согласно которым будем печатать детали для робота:

- высокая точность печати;
- экономичность;
- кастомизация, т.е. возможность в дальнейшем улучшить, либо внести свои изменения в принтеры с открытым исходным кодом.

3.7.1 Технологии печати 3D-принтеров

Существует множество технологий 3D-печати. Была составлена таблица для наглядного сравнения и выбора оптимальной.

Таблица 3.8 – Технологии печати 3D-принтеров

Метод	Технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (такие как полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF3)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать(3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

Исходя из материала печати, выбор пал на популярный ввиду достаточно высокого качества печати и дешевизны 3D-принтер типа RepRap

с площадью печати 22x22 см, Prusa i3 на плате Anet A8. Были проведены работы по улучшению качества печати и отказоустойчивости [15].

3.7.2 Тонкости работы с 3D-принтером

Во время сборки и процесса печати могут возникнуть разного рода проблемы. Ответы на не которые из них можно с легкостью найти на русскоязычных сайтах сети Интернет, а некоторые приходится искать на зарубежных .

Может быть так, что шаговые двигатели принтера издают звуки вибрации во время печати по оси Z, либо не двигаются, либо происходит пропуск шагов при печати. Также может происходить сильный нагрев шагового двигателя.

Для решения первых двух проблем в первую очередь надо проверить, совпадают ли оси двигателей и муфт.

Если это не помогло, то необходимо настроить значение напряжения на главной плате, либо на драйверах питания двигателей при помощи встроенного подстроечного резистора. Пропуск шагов при печати происходит, как правило из-за низкого значения тока, сильный нагрев – из-за слишком большого. Во время настройки необходимо отключить сам двигатель, чтобы не сжечь его драйвер.

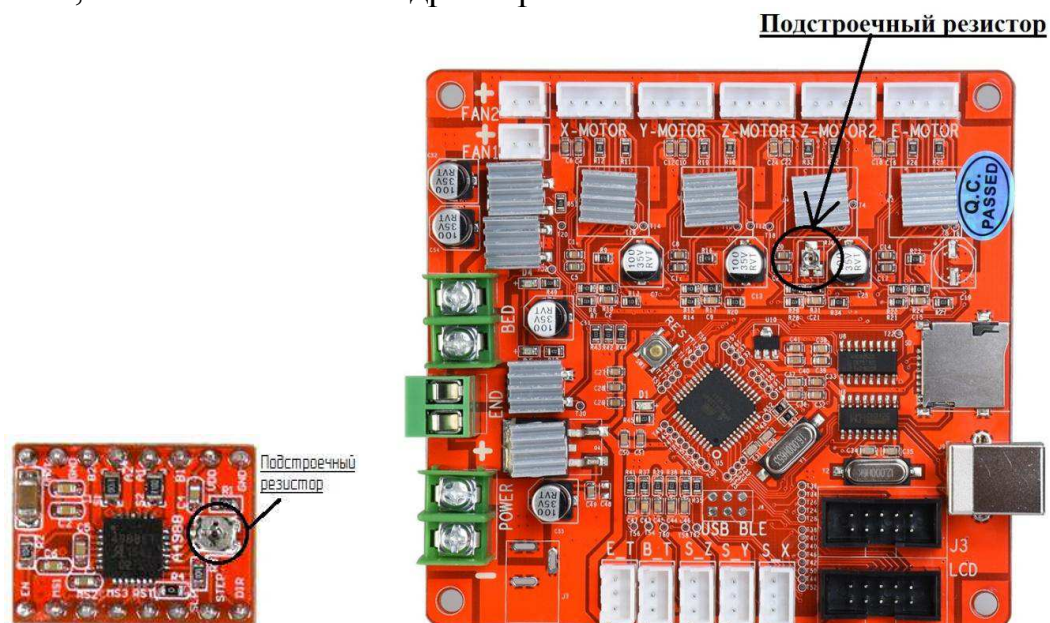


Рисунок 3.12 – Внешний вид встроенного подстроечного резистора

Формула нахождения номинального напряжения выглядит вот так:

$$V_{REF} = I_{max} \cdot (n \cdot RS) , \text{где}$$

$I_{\max} = 1.7 \text{ А}$ – номинальный ток (его значение берем из документации двигателя, у меня 42SHDC3025-24B)[16],

n – количество обмоток,

$R_S = 0.1 \text{ Ом}$ – сопротивление токочувствительных резисторов. Следовательно значение номинального напряжения равно:

$$V_{REF} = 1.7 \cdot 8 \cdot 0.1 = 1.36V$$

При вращении в микрошаговом режиме фазы шагового двигателя управляются токами, распределенными по законам синуса и косинуса. Эти функции пересекаются в точке, где обе фазы запитаны максимальным током [16,17,18,19].

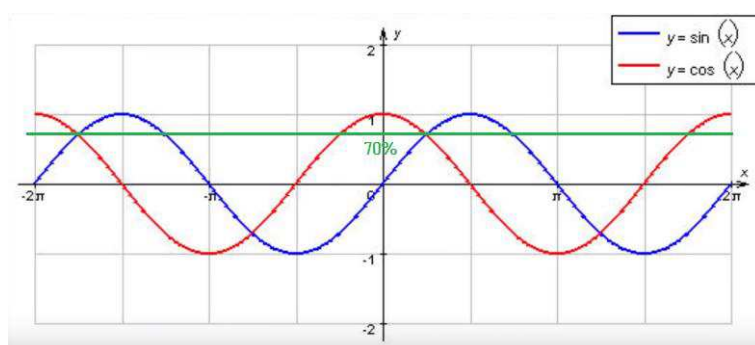


Рисунок 3.13 – Закон синуса и косинуса при вращении в микрошаговом режиме при максимальном токе

Поэтому в драйвере шагового двигателя при использовании микрошага он способен отдать не более 70% от момента удержания, следовательно, истинное значение напряжения будет равно:

$$V_{REF} = 0.7 \cdot V_{REF} = 0.95V$$

Если решить проблему не получилось, скорее всего потребуется смена прошивки принтера[20,21,22,23].

3.8 Выбор материалов для печати и их сравнение

Для 3d-печати по технологии FDM существует много видов пластмассы. Материал для печати должен обладать следующими свойствами:

- обладать низкой термоусадкой (обладать размерной стабильностью) для того, чтобы параметры цифровой модели как можно максимально совпадали с параметрами реальной модели во избежание люфтов;
 - быть достаточно прочным и жёстким;
 - выдерживать сильные механические воздействия;
 - легко обрабатываться;
 - быть экологически чистым;
- обладать водостойкостью, термостойкостью, стойкостью к ультрафиолетовым лучам, жирам;
 - также отличным уровнем скольжения и высоким уровнем электроизоляции.

Изучив источники, была обобщена информация по основным видам пластмассы для 3d-печати и составлена таблица со следующими свойствами материалов: достоинства, недостатки (ПРИЛОЖЕНИЕ Б), растворимость/обработка, температурная нагрузка, температура плавления, применение и прочие свойства (ПРИЛОЖЕНИЕ В)[24].

Таким образом, ввиду соответствии свойствам, описанным выше, для печати деталей робота был выбран PLA-пластик. Ниже приведены характеристики для PLA-пластика, с которым была проведена работа. Диаметр прутка – 1.75 мм[25].

Таблица 3.9 – Характеристики PLA-пластика

Характеристики	Значение
Температура экструзии	205 – 220 °C
Температура стола	40 – 60 °C
Обдув	20% – первый слой, 100% – последующие.
Межслойная адгезия	Хорошая
Адгезия к столу	Хорошая
Температура эксплуатации изделий	-20 – +40°C
Твердость по Роквеллу	R70 – R90
Относительное удлинение при разрыве	3,8%
Прочность на изгиб	55,3 МПа
Прочность на разрыв	57,8 МПа
Модуль упругости при растяжении	3,3 ГПа
Модуль упругости при изгибе	2,3 ГПа
Температура стеклования	60-65°C
Плотность	1,23-1,25 г/см ³

Продолжение таблицы 3.9

Характеристики	Значение
Минимальная толщина стенок	1 мм
Точность печати	$\pm 0,1\%$
Усадка при изготовлении изделий	1 мм по горизонтали, по вертикали – не заметна.
Влагопоглощение	0,2-0,4%

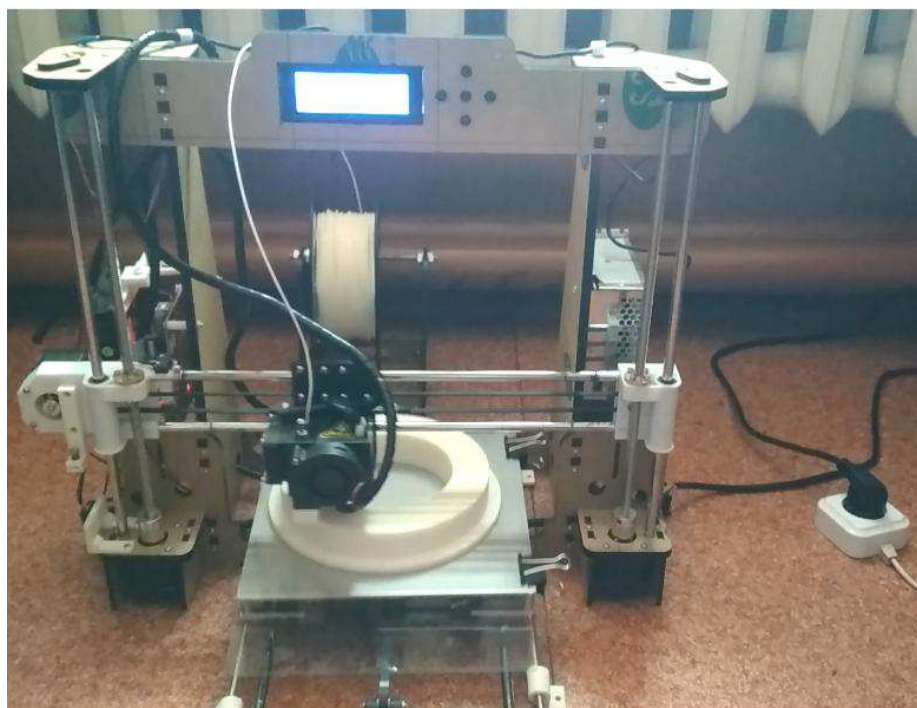


Рисунок 3.14 – 3D-принтер Prusa i3 Anet A8

4 Система управления трехзвенным роботом

В данном проекте разработана СУ с программным управлением, основой которых является синтез движения робота по заранее рассчитанной преимущественно жесткой программе. Программа сохраняется в памяти вычислительного устройства и может быть изменена путем перепрограммирования в новом цикле обучения робота. В системах программного управления не предусматривается отработка информации, устраняющая неопределенность характеристик внешней среды, хотя информация о внутреннем фазовом состоянии робота используется в законе управления.

4.1 Общая схема архитектуры

Система управления роботом предназначена для обеспечения совместной работы всех подсистем и компонентов робота с целью перемещения рабочего органа в заданную точку или выполнения движений по заданной траектории. Робот как объект управления представляет собой сложную систему, состоящую из многозвенной механической конструкции, микропроцессорного устройства управления, ЭВМ и источников постоянного тока. Задача управления роботом заключается в формировании управляющих воздействий для исполнительных приводов каждой степени подвижности.

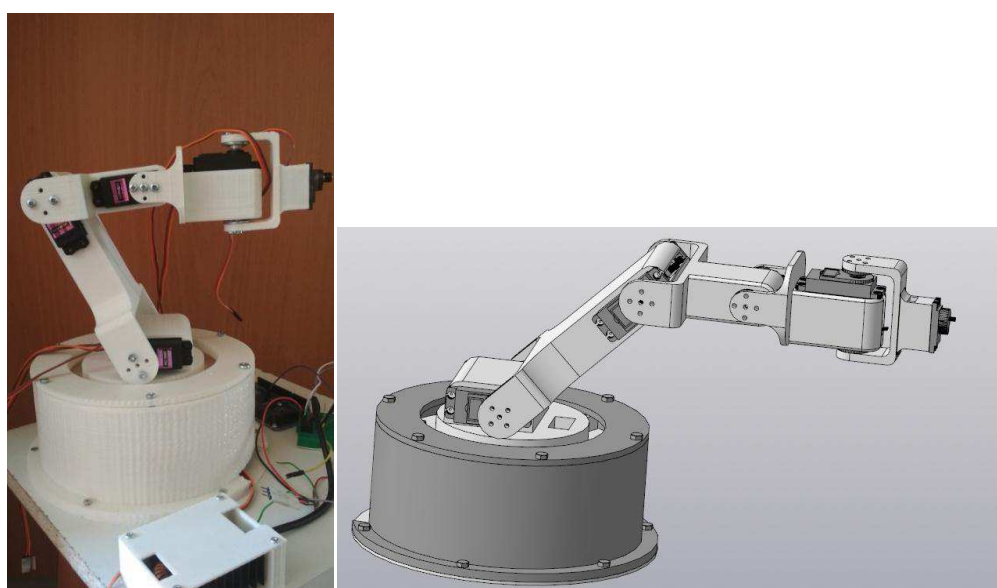


Рисунок 4.1 – Шестиосевой манипуляционный робот и его 3D-модель

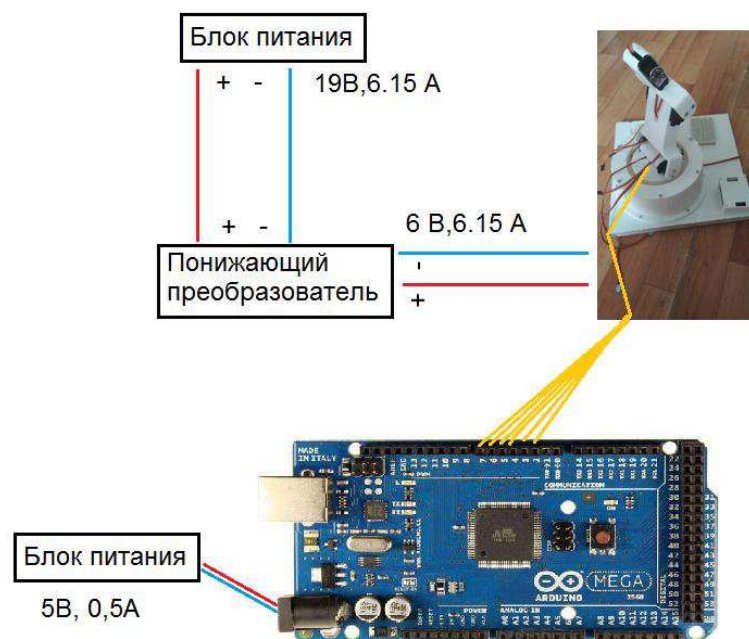


Рисунок 4.2 – Схема подключения всех компонентов робота

5 Управление манипуляционным роботом

Кинематикой роботов называется систематическое учение о движении динамической робототехнической системы в трехмерном пространстве в зависимости от времени без учета сил и моментов, порождающих такое движение.

В данной работе будет рассмотрено решение прямой и обратной задач кинематики трёхзвенного манипуляционного робота с шестью степенями свободы (подвижности). Сформулируем их так:

Решение прямой задачи кинематики в робототехнике заключается в определении кинематического положения схвата, если задан вектор перемещений сочленений $\theta_i = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \dots \ \theta_n]^T$ манипуляционного робота с n -степенями свободы.

Решение обратной задачи кинематики заключается в определении вектора компонент перемещений сочленений θ_i манипуляционного робота с n -степенями подвижности для данного кинематического положения схвата по отношению к базовой системе координат[26,27].

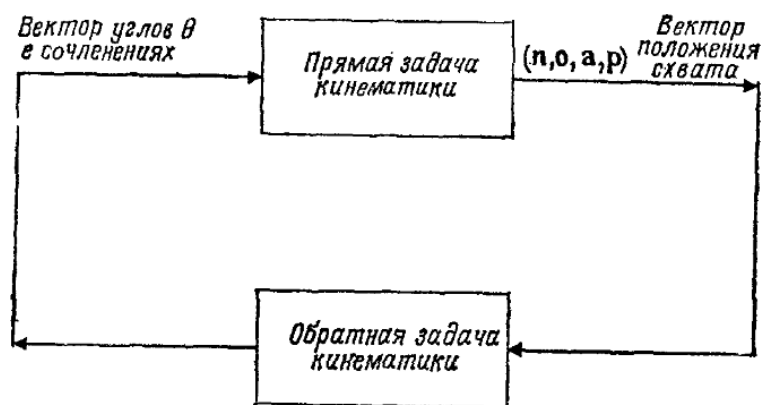


Рисунок 5.1 – Связь прямой и обратной задачи кинематики манипуляторов

5.1 Прямая задача кинематики. Представление Денавита-Хартенберга

Для решения прямой задачи кинематики применяется представление Денавита-Хартенберга. Манипулятор состоит из набора звеньев, соединенных при помощи набора сочленений. Однородные преобразования по отношению к локальным системам координат сочленений называются **А**-матрицами (т.е. преобразования Денавита-Хартенберга). Тогда положение и ориентация n -го звена в системе координат основания будут[3]:

$$T_n = A_1 A_2 A_3 \dots A_{n-1} A_n \quad (5.1)$$

$$A_{i-1}^i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & a_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & a_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

5.2 Системы координат сочленений манипуляционного робота

Произведение **A**-матриц называют **T**-матрицами. T_6 – преобразование, относящееся к схвату, такое, что начало системы координат схвата имеет вектор положения $\mathbf{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$.

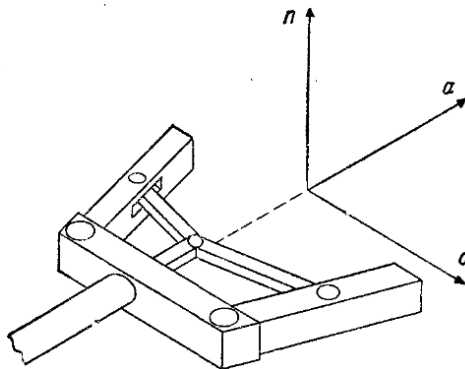


Рисунок 5.2 – Ориентация схвата и его системы координат.

\mathbf{n} – вектор нормали, \mathbf{o} – вектор ориентации, \mathbf{a} – вектор подхода

Заметим, что \mathbf{a} , \mathbf{o} и \mathbf{n} образуют правостороннюю систему координат, т.е. $\mathbf{a} \times \mathbf{o} = \mathbf{n}$, $\mathbf{o} \times \mathbf{n} = \mathbf{a}$ и $\mathbf{n} \times \mathbf{a} = \mathbf{o}$. Заметим, что в этом случае

$$T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Аналогично, для системы обобщенных координат любого звена \mathbf{i} направление звена в сочленении – это направление вектора подхода \mathbf{a}_i , направление относительного поворота звеньев – направление вектора ориентации \mathbf{o}_i и единичный вектор нормали \mathbf{n}_i образует правостороннюю систему с \mathbf{o}_i и \mathbf{a}_i .

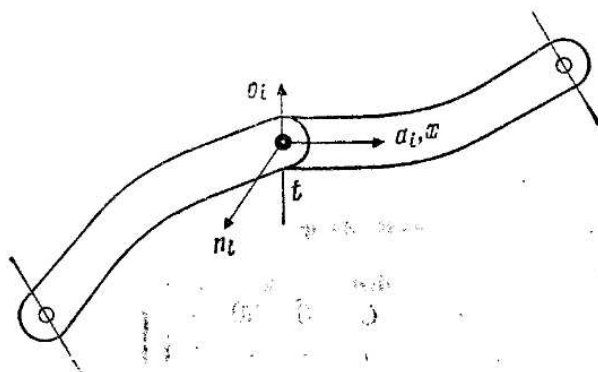


Рисунок 5.3 – Система координат i -го сочленения робота

Опять вектор положения i -го сочленения в системе координат основания равен p_i , а преобразование T_i , соответствующее этому звену, имеет вид

$$T_i = \begin{bmatrix} n_{ix} & o_{ix} & a_{ix} & p_{ix} \\ n_{iy} & o_{iy} & a_{iy} & p_{iy} \\ n_{iz} & o_{iz} & a_{iz} & p_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Для твердых звеньев представление зависит от четырех геометрических параметров, соответствующих каждому звену. Эти четыре параметра полностью описывают любое вращательное или поступательное движение и определяются в соответствии с рисунком 5.4 следующим образом[27]:

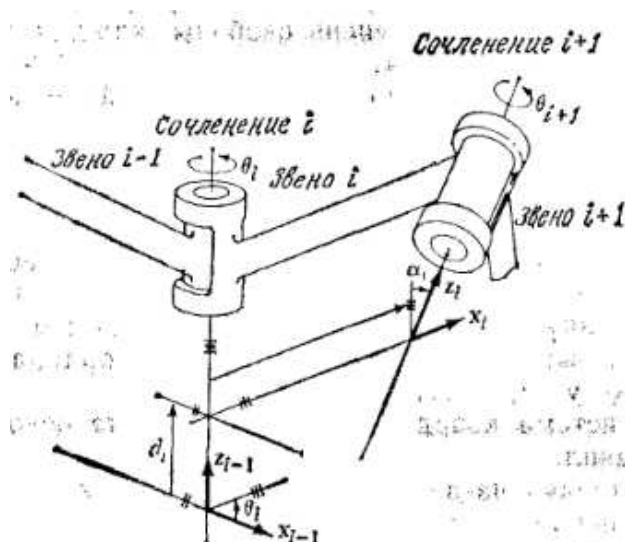


Рисунок 5.4 – Система координат звена и ее параметры

θ_i – присоединенный угол – угол, на который надо повернуть ось x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , чтобы она стала сонаправлена с осью x_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки), т.е. угол между осью x_i и x_{i-1} ;

d_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом $(i-1)$ – й системы координат, отсчитываемое вдоль оси z_{i-1} ;

a_i – линейное смещение - расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом i – й системы координат, отсчитываемое вдоль оси x_i , т.е. кратчайшее расстояние между осями z_{i-1} и z_i ;

α_i – угловое смещение – угол, на который надо повернуть ось z_{i-1} вокруг оси x_i , чтобы она стала сонаправленной с осью z_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки).

Построим множество систем координат трехзвенного робота-манипулятора для каждой из шести степеней свободы:

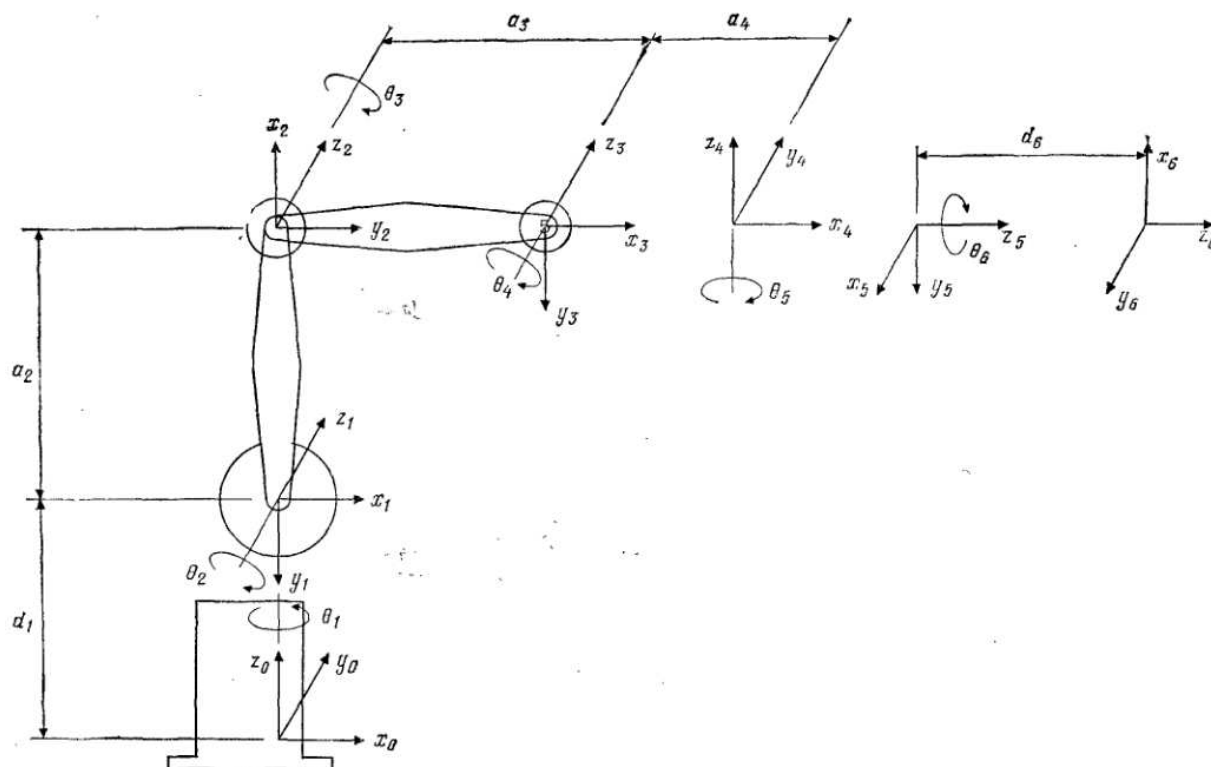


Рисунок 5.5 – Расположение систем координат

Для вращательных сочленений параметры d_i , a_i и α_i являются характеристиками сочленения, постоянными для данного типа робота. В то время как θ_i является переменной величиной, изменяющейся при движении (вращении) i -го звена относительно $(i-1)$ -го.

Для поступательных сочленений параметры θ_i , a_i и α_i – характеристики сочленения, неизменные для данного робота, а d_i – переменная величина.

5.3 Алгоритм 2.10.1. "Формирование систем координат звеньев"

Этот алгоритм полностью назначает и описывает системы координат звеньев, совместимые с преобразованием Денавита-Хартенберга для данного исполнительного механизма робота с n степенями подвижности. Начало систем координат основания принято за 0-ое сочленение.

1. Определить базовые координаты $[x_0 y_0 z_0]$ так, чтобы ось z_0 совпадала с осью движения первого сочленения.
2. Прodelать следующие пункты последовательности для каждого $i = 1, 2, \dots, n$.
3. Направить все оси z_i параллельно осям поступательного движения или вращения $(i+1)$ -го сочленения.
4. Задать начало i -ой системы координат либо на пересечении осей z_i и z_{i-1} , либо в точке пересечения оси z_i с общей нормалью к осям z_{i-1} и z_i .
5. Задать ось x_i в каждом i -ом сочленении либо в соответствии с соотношением $x_i = \pm (z_i \times z_{i-1})$, либо вдоль общей нормали к осям z_{i-1} и z_i , если они параллельны.
6. Задать ось y_i из соотношения $y_i = \pm (z_i \times x_i)$ для завершения правосторонней системы координат.
7. Найти d_i как расстояние от начала координат $(i-1)$ -й системы координат до точки пересечения осей z_{i-1} и x_i .
8. Найти a_i как расстояние от точки пересечения оси z_{i-1} с общей нормалью к осям z_{i-1} и z_i до начала i -й системы координат.
9. Найти θ_i как угол поворота от оси x_{i-1} до оси x_i .
10. Найти α_i как угол поворота от оси z_{i-1} до оси z_i относительно x_i .

5.4 Обратная задача кинематики. Обзор алгоритмов решения обратной задачи.

Обратную задачу кинематики решают многократным решением прямой задачи различными математическими методами, предложенными ниже:

- а) метод покоординатного спуска;
- б) градиентный метод;
- в) симплексный метод.

Основным недостатком методов прямого поиска является невозможность одновременного целенаправленного изменения всех параметров на одном шаге итерации.

Метод координатного спуска является простым в реализации методом оптимизации. Главным недостатком метода является его ограниченная

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

применимость, а также медленная сходимость процесса при неудачном выборе стартовой точки и возможность получить локальный экстремум.

Недостатком **градиентного метода** является то, что при его использовании можно обнаружить только локальный минимум целевой функции. Другим недостатком этого метода является значительный объем вычислений, т.к. на каждом шаге определяются значения всех частных производных оптимизируемой функции по всем независимым переменным.

Один из существенных недостатков градиентного метода связан с его чувствительностью к погрешностям вычислений. Особенно сильно этот недостаток сказывается в малой окрестности точки минимума, где антиградиент, задающий направление поиска, мал по модулю. Поэтому эффективность градиентного метода на завершающей стадии поиска существенно ниже, чем на начальной стадии.

Причины, по которым **симплексный поиск** дает другие результаты могут быть следующие:

- многоэкстремальность функции, в таком случае симплекс найдет первый локальный экстремум;
- т.к. длины ребер симплекса уменьшаются по ходу работы алгоритма, то они могут стать слишком маленькими и пропустить экстремум, либо найти локальный;
- необходимо использовать Optimization Toolbox;

Метод симплексного поиска не лишен *недостатков*. Одним из них является возникающая проблема масштабирования, которая появляется от того, что координаты вершин симплекса определяются при помощи одного масштабного коэффициента. Поэтому для решения реальных задач необходимо масштабировать все переменные, чтобы их значения были сравнимы по величине.

Кроме того, алгоритм не использует информацию о предыдущих итерациях для ускорения поиска, и, как следствие, работает достаточно медленно.

5.5 Проблема решения обратной задачи кинематики роботов

При решении обратной задачи могут возникнуть следующие проблемы:

- сразу несколько решений (многоэкстремальность). Это объясняется множеством точек минимума в решении обратной задачи;

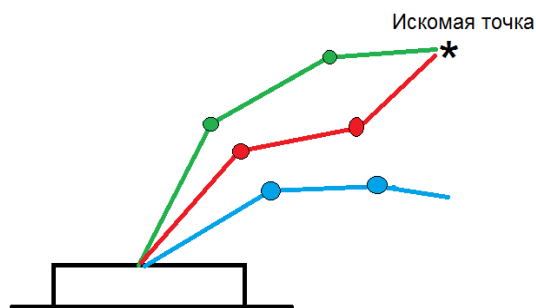


Рисунок 5.6 – Многоэкстремальность при решении обратной задачи

- найденная точка (результат) может не соответствовать искомой точке (заданной). Объясняется это тем, что ошибка в случае кратчайшего минимальна, а большего – максимальна.



Рисунок 5.7 – Позиционные ограничения при решении обратной задачи

6 Разработка программного обеспечения

На основе алгоритмов, определенных в разделе 5, были составлены 2 основные программы:

- программа решения прямой и обратной задачи кинематики методами покоординатного спуска и симплексного поиска;
- программа управления и синхронизации сервоприводами робота.

Программа решения прямой и обратной задач была разработана в среде программирования Matlab и рассчитана для работы с интерфейсом манипуляционного робота.

MATLAB — это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов. С помощью MATLAB можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения. MATLAB по сравнению с традиционными языками программирования (C/C++, Pascal, FORTRAN) позволяет на порядок сократить время решения типовых задач и значительно упрощает разработку новых алгоритмов.

Управлением и синхронизацией сервоприводов занимается код для Arduino. По структуре он похож на C/C++.

При написании программ, я руководствовался принципом инкапсуляции.

Инкапсуляция – возможность скрытия реализации каких либо частей модуля или объекта от внешнего мира (от клиента)[55]. То есть любому другому, кто будет пользоваться функцией не обязательно знать как она устроена.

При объяснении общих структур программ будет удобнее изобразить их работу в виде блок-схем.

6.1 Общая структура программы для MATLAB

Так как структура программы для решения прямой и обратной задачи имеет сложный вид, на рисунке 6.1 будет показана его упрощенная структура. Каждая функция, описанная ниже, включает в себя несколько подфункций, связанных между собой.

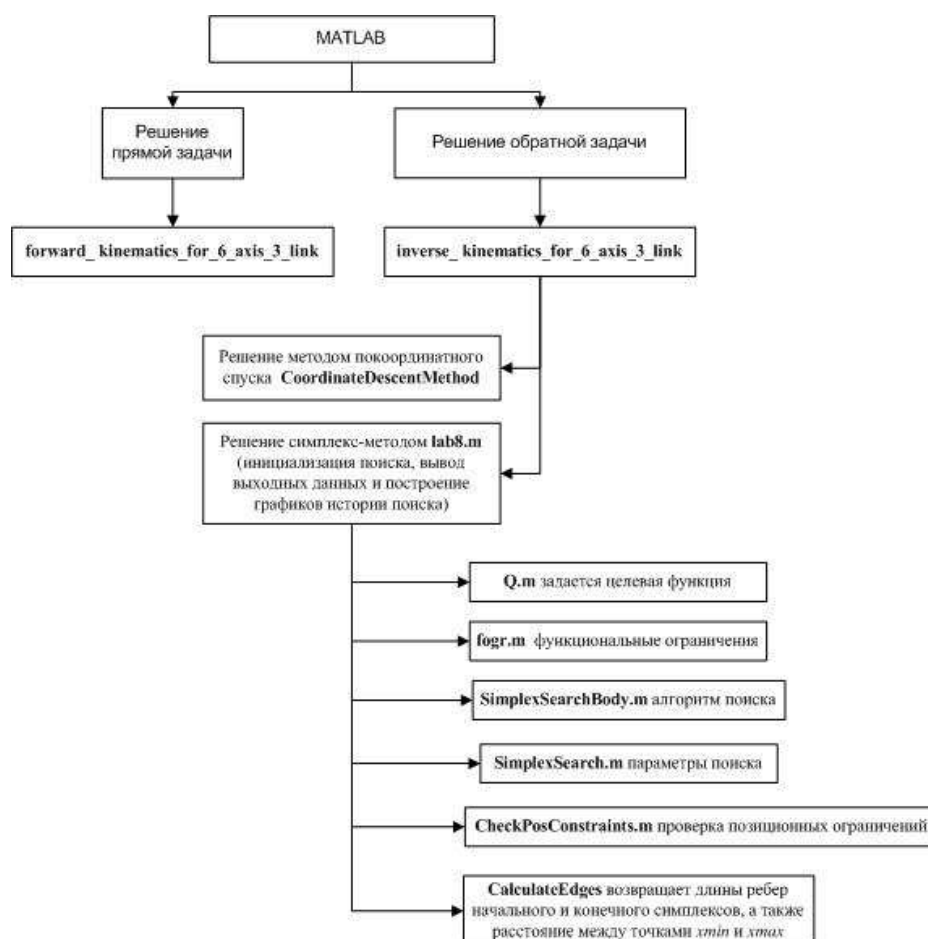


Рисунок 6.1 – Общая структура программы для MATLAB

6.2 Функция решения прямой задачи

Функция решения прямой задачи *Forward_kinematic_decision_button_Callback* содержит на проверку наличие ввода параметров: длин звеньев, звенные расстояния и углы поворота. Также состоит из функции *forward_kinematics_for_6_axis_3_link*, в которой и происходят основные вычисления согласно преобразованию Денавита-Хартенберга, построение поверхности, сочленений и звеньев.

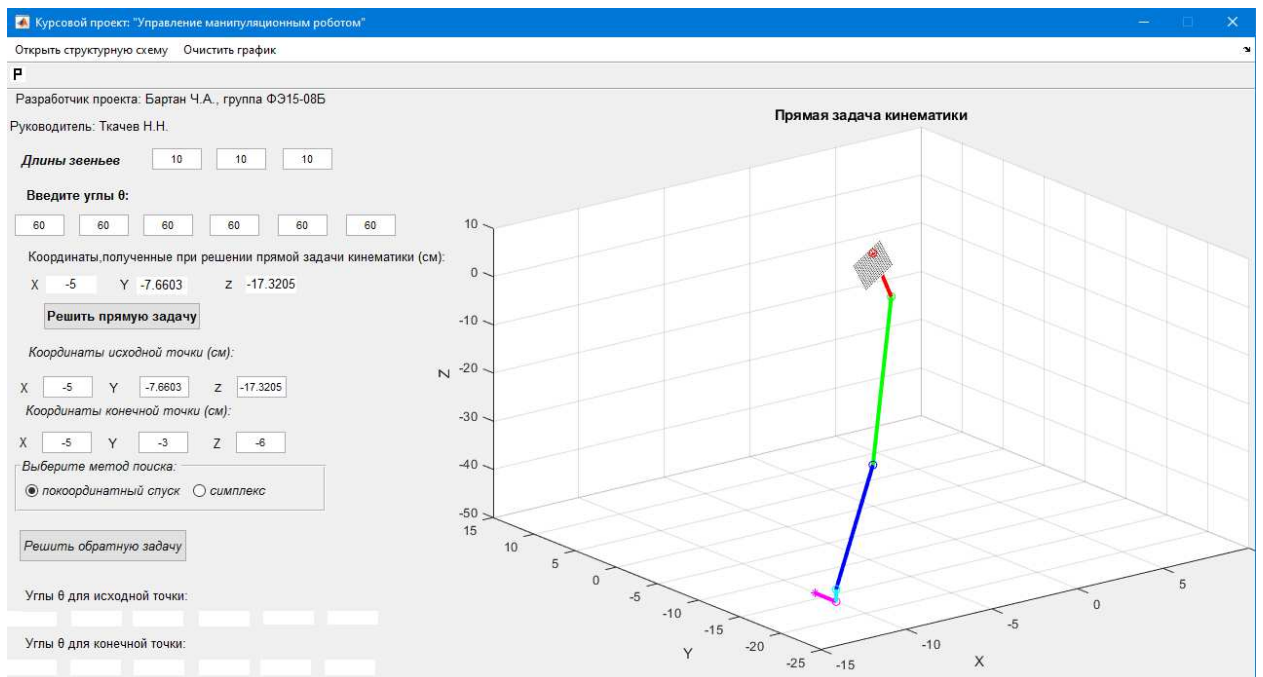


Рисунок 6.2 – Результат решения прямой задачи кинематики

6.3 Функция решения обратной задачи

Функция решения прямой задачи *Inverse_kinematic_decision_button_Callback* содержит на проверку наличие ввода параметров: длин звеньев, звенные расстояния, начальную и конечную точки. Также состоит из функции *inverse_kinematics_for_6_axis_3_link*, в которой и происходят:

- вызов функций решения симплекс-методом и методом покоординатного спуска;
- построение поверхности, сочленений и звеньев.

6.3.1 Функция решения методом покоординатного спуска

1. Задаем начальные параметры: число сочленений, точность, шаг поиска, целевую точку, начальные углы поиска, число шагов алгоритма, число повторов алгоритма, инициализируем получившуюся точку:

Листинг программы:

```
%Число сочленений
n=6;
%Точность
e=0.001;
Shag=0.001;%от min до max угла
%Задаём целевую точку
aim = [final_X final_Y final_Z];%искомая точка
```



```
tetta = [0 0 0 0 0 0]; %начальные углы
```

```
%Программа использующая в качестве метода оптимизации параметров схемы  
алгоритм покоординатного спуска
```

```
w=0; %число шагов алгоритма
```

```
q=1; %число повторов цикла
```

```
%Rez=0;
```

```
RezP=[0 0 0]; %получившаяся точка P в ходе работы алгоритма
```

```
h=1;
```

2. Считаем начальное положение схвата и начальное значение расстояния до искомой точки.

Листинг программы:

```
A01=[cos(tetta(1)) (-cos(alpha(1))*sin(tetta(1)))  
(sin(alpha(1))*sin(tetta(1))) a(1)*cos(tetta(1)); sin(tetta(1))  
(cos(alpha(1))*cos(tetta(1))) (-sin(alpha(1))*cos(tetta(1)))  
(a(1)*sin(tetta(1))); 0 sin(alpha(1)) cos(alpha(1)) d(1); 0 0 0 1];
```

```
A12=[cos(tetta(2)) (-cos(alpha(2))*sin(tetta(2)))  
(sin(alpha(2))*sin(tetta(2))) a(2)*cos(tetta(2)); sin(tetta(2))  
(cos(alpha(2))*cos(tetta(2))) (-sin(alpha(2))*cos(tetta(2)))  
(a(2)*sin(tetta(2))); 0 sin(alpha(2)) cos(alpha(2)) d(2); 0 0 0 1];
```

```
A23=[cos(tetta(3)) (-cos(alpha(3))*sin(tetta(3)))  
(sin(alpha(3))*sin(tetta(3))) a(3)*cos(tetta(3)); sin(tetta(3))  
(cos(alpha(3))*cos(tetta(3))) (-sin(alpha(3))*cos(tetta(3)))  
(a(3)*sin(tetta(3))); 0 sin(alpha(3)) cos(alpha(3)) d(3); 0 0 0 1];
```

```
A34=[cos(tetta(4)) (-cos(alpha(4))*sin(tetta(4)))  
(sin(alpha(4))*sin(tetta(4))) a(4)*cos(tetta(4)); sin(tetta(4))  
(cos(alpha(4))*cos(tetta(4))) (-sin(alpha(4))*cos(tetta(4)))  
(a(4)*sin(tetta(4))); 0 sin(alpha(4)) cos(alpha(4)) d(4); 0 0 0 1];
```

```
A45=[cos(tetta(5)) (-cos(alpha(5))*sin(tetta(5)))  
(sin(alpha(5))*sin(tetta(5))) a(5)*cos(tetta(5)); sin(tetta(5))  
(cos(alpha(5))*cos(tetta(5))) (-sin(alpha(5))*cos(tetta(5)))  
(a(5)*sin(tetta(5))); 0 sin(alpha(5)) cos(alpha(5)) d(5); 0 0 0 1];
```

```
A56=[cos(tetta(6)) (-cos(alpha(6))*sin(tetta(6)))  
(sin(alpha(6))*sin(tetta(6))) a(6)*cos(tetta(6)); sin(tetta(6))  
(cos(alpha(6))*cos(tetta(6))) (-sin(alpha(6))*cos(tetta(6)))  
(a(6)*sin(tetta(6))); 0 sin(alpha(6)) cos(alpha(6)) d(6); 0 0 0 1];
```

```
T1=A01;
```

```
T2=T1*A12;
```

```
T3=T2*A23;
```

```
T4=T3*A34;
```

```
T5=T4*A45;
```

```
T6=T5*A56;
```

```
P=[T6(1,4) T6(2,4) T6(3,4)]; %наша получившаяся точка, стремиться к  
целевой
```

```
%P=[initial_X initial_Y initial_Z]; %начальная точка поиска
```

3. Инициализируем невязку.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

Листинг программы:

```
J=zeros(1,10);%инициализируем невязку
rez=0;

for i=1:3
rez = rez + (aim(i)-P(i))^2;%целей - получ
end

rez = sqrt(rez);
J(1)=rez;%нач. значение невязки
R(1,:)=P;
```

4. Запускаем алгоритм покоординатного спуска.

6.3.2 Функция решения симплекс-методом

В функции **Q.m** задается целевая функция. Переменные передаются в массиве x ; для обращения к конкретной переменной необходимо использовать синтаксис $x(i)$, где i – порядковый номер переменной. Результат записывается в переменную *ret*.

В функции **lab8.m** происходит инициализация поиска, вывод выходных данных и построение графиков истории поиска. Здесь необходимо задать следующие параметры:

- kp – режим поиска – поиск минимума (значение 0) или максимума (значение 1);
- n – размерность пространства поиска;
- $X0$ – начальное положение поиска (массив переменных x_1, x_2, \dots, x_n);
- $xmin, xmax$ – позиционные ограничения (массивы);
- $axes$ – номера переменных, для которых нужно построить графики истории поиска (массив из двух чисел);
- $gridRes$ – разрешение сетки графиков истории поиска.

Помимо перечисленных параметров пользователю следует также определить целевую функцию Q и функциональные ограничения $fogr$ (см. ниже). При необходимости также можно произвести более тонкую настройку поиска в файле SimplexSearch.m (см. ниже).

В функции **fogr.m** описываются функциональные ограничения. Аналогично с **Q.m**, переменные передаются в массиве x . Если данное значение x находится вне зоны поиска, то в *ret* записывается положительное число, в противном случае в *ret* записывается отрицательное число или ноль.

В функции **SimplexSearch.m** является основным файлом программы поиска: функция SimplexSearch принимает параметры поиска – режим поиска, количество переменных, целевую функцию и др., и возвращает

историю поиска – массив всех точек траектории поиска и значений целевой функции в них.

В функции **SimplexSearchBody.m** описывается алгоритм поиска.

В функции **CheckPosConstraints.m** находится функция, принимающая массив переменных поиска x и возвращающая количество тех из них, для которых были нарушены позиционные ограничения.

В функции **CalculateEdges** возвращает длины ребер начального и конечного симплексов, а также расстояние между точками x_{min} и x_{max} (см lab8.m).

6.4 Общая структура программы для Arduino

Структура программы максимально упрощена для конечного пользователя, следуя принципам инкапсуляции. Программа состоит из:

- директив препроцессора `#include <Servo.h>` и задания глобальных переменных;
- основной функции `loop()`, в которой размещен основной код программы и обращение к функциям, которые управляют движениями роботом;
- функции `setup()`, в которой происходит прикрепление пинов;
- функций `Rotate_1_Axis()`, `Rotate_2_Axis()`, `Rotate_3_Axis()`, `Rotate_4_Axis()`, `Rotate_5_Axis()`, `Rotate_6_Axis()`, которые отвечают за поворот углов каждой из шести степеней свободы соответственно;
- функций `Open()` и `Close()`, отвечающих за открытие и закрытие схвата.

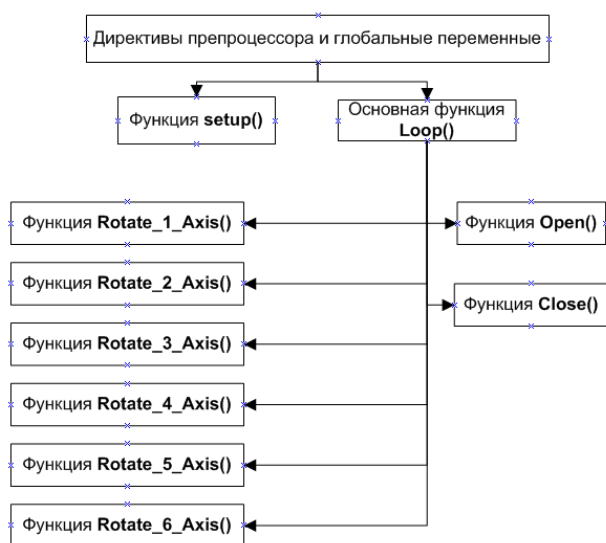


Рисунок 6.3 – Общая структура программы для Arduino

Отдельно стоит отметить, что в функциях *Rotate_1_Axis()*, *Rotate_2_Axis()*, *Rotate_3_Axis()*, *Rotate_4_Axis()*, *Rotate_5_Axis()*, *Rotate_6_Axis()* осуществлена проверка по текущему положению схвата, т.е. не надо каждый раз возвращать углы в исходное положение. Осуществляется при помощи функции *myservo.read()*.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

7 Технико-экономическое обоснование проекта

В соответствии с техническим заданием на дипломное проектирование для исследовательских работ было приобретено необходимое оборудование и программное обеспечение. В данном разделе производится расчёт сметы затрат, связанных с их приобретением и обслуживанием.

Смета затрат – это выражение в денежной форме затрат предприятия на разработку и выполнение хозяйственно-договорной работы. Смета затрат будет складываться из затрат на:

- а) основное оборудование и программное обеспечение;
- б) электроэнергию;
- в) амортизацию оборудования;

Далее представлен расчет всех составляющих сметы затрат.

7.1 Расчет затрат на основное оборудование и программное обеспечение

Стоимость затрат на приобретение компонентов и программного обеспечения вычислим по формуле:

$$S_z = S_{об} + S_{прог}, \quad (7.1)$$

где $S_{об}$ – стоимость затрат на приобретение компонентов;

$S_{прог}$ – затраты на приобретение программного обеспечения.

Затраты на приобретение программного обеспечения приведены в таблице 7.1, затраты на приобретение оборудования – в таблице 7.2.

Таблица 7.1 – Стоимость программного обеспечения

Наименование	Стоимость, руб.
Microsoft Windows 10 Professional RU x86-64	4000
Microsoft Office 2013 Professional	9398
MATLAB and Simulink Student Suite	3430
KOMPAS 3D Home	1490
Общая стоимость	18318

Таблица 7.2 – Стоимость компонентов

Наименование	Количество, шт.	Цена за шт., руб.	Сумма, руб.
PLA-пластик	2	1500	3000
Сервопривод TowerPRO MG996R	7	330	2310
Сервопривод MG90S	2	130	260
Wi-fi модуль NodeMcu v3 Lua	1	790	790
Arduino Mega 2560	1	1020	1020
Блок питания HP 19V, 6.15 A	1	1200	1200
Понижающий преобразователь напряжения XL4016	1	610	610

Продолжение таблицы 7.2.

16-битный ШИМ- контроллер для питания и управления сервоприводами на основе PCA9685	1	400	400
3D-принтер	1	12467	12467
Винты М3*8 (с шестигранным углублением под ключ)	36	-	20
Ноутбук Acer /4.0Gb/500Gb/1024Mb	1	15000	15000
Общая стоимость	33010		

Общая стоимость затрат на приобретение компонентов и программного обеспечения равна:

$$S_3 = 33010 + 18318 = 51328 \text{ руб.} \quad (7.2)$$

7.2 Затраты на электроэнергию

Исходные данные для расчета стоимости электроэнергии:

— $P_{ПК} = 65 \text{ Вт}$ – мощность, потребляемая ноутбуком:

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

— $P_{\text{л}} = 18$ Вт – мощность, потребляемая лампой дневного света;

— $n = 12$ – количество ламп дневного света;

— $T_{\text{эл.}} = 2.26$ руб./кВт · ч. - тариф на электроэнергию;

— $N_{\text{ч}} = 84$ дней – количество рабочих дней;

— $N_{\text{ч}} = 8$ ч. – часов за рабочий день.

Расходы на электроэнергию:

$$S_{\text{эл.д.}} = (P_{\text{ПК}} + P_{\text{л}} \cdot n) \cdot N_{\text{ч}} \cdot T_{\text{эл.}} \cdot N_{\text{д}} \quad (7.3)$$

Рассчитаем расходы на электроэнергию:

$$S_{\text{эл.д.}} = (0,065 + 0,018 \cdot 12) \cdot 8 \cdot 2,26 \cdot 84 = 426 \text{ рублей} \quad (7.4)$$

7.3 Затраты на амортизацию оборудования

Для расчёта затрат на амортизацию оборудования необходимо определить время эксплуатации, первоначальную стоимость оборудования и срок службы. Определим затраты на амортизацию компьютера по формуле:

$$Z_{\text{AK}} = \frac{C_{\text{К}} \cdot n_{\text{м}}}{n_{\text{л}} \cdot 12}, \quad (7.5)$$

где $C_{\text{К}} = 15000$ руб. – первоначальная стоимость оборудования;

$n_{\text{м}} = 4$ месяца – время эксплуатации;

$n_{\text{л}} = 5$ – срок службы. Тогда

$$Z_{\text{А}} = Z_{\text{AK}} = \frac{15000 \cdot 4}{5 \cdot 12} = 1000 \text{ руб.} \quad (7.6)$$

7.4 Смета затрат

Все затраты, связанные с приобретением и использованием оборудования и программного обеспечения, амортизацию, оплату труда и аренду помещения, приведены в таблице 7.3 и показаны в доленом соотношении на рисунке 7.1.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

Таблица 7.3 – Смета затрат

Наименование затрат	Сумма затрат, руб.
Затраты на программное обеспечение и оборудование	51328
Затраты на амортизацию оборудования	1 000
Затраты на электроэнергию	426
Итого	52754

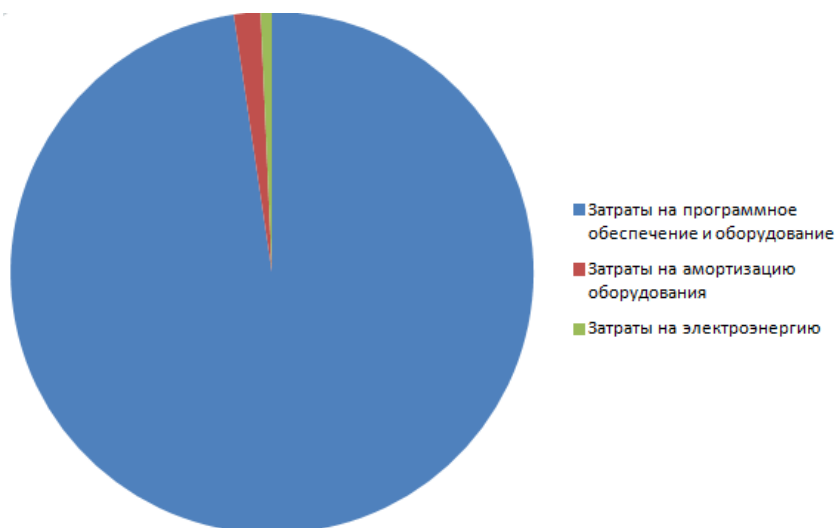


Рисунок 7.1 – Диаграмма затрат

7.5 Выводы по разделу и способы экономии

В данном разделе определена смета затрат на дипломное проектирование для исследовательских работ. Как видно из таблицы 7.3, основную часть затрат занимает покупка программного обеспечения. В связи с этим, в этом разделе предложены способы экономии. Рассмотрим их:

- *Операционная система:*

Можно снизить затраты, установив операционную систему *Linux*, т.к. она распространяется по свободной лицензии, в том числе и при коммерческом использовании. Она может принимать интерфейс, схожий с Windows. Также есть эмулятор Wine, который позволяет запускать программы, написанные для Windows на Linux.

Также можно установить *Windows* по *OEM*-лицензии. Это обойдется в сумму от 300 до 1200 рублей.

- *Office*

Программу для отчетов также можно приобрести по свободной лицензии. Сейчас распространены *LibreOffice* и *LibreOffice*.

- *Система программирования*

Для математических расчетов все большую популярность набирает язык *Python* ввиду простоты написания и читабельности кода. Для научных расчетов также существуют библиотеки. Распространяется по свободной лицензии.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

8 Безопасность и экологичность проекта

В данной главе проведена оценка безопасности и экологичности дипломного проекта. Стоит отметить, что основная часть мер безопасности реализована на проектном этапе. Безопасность оборудования соответствует требованиям ГОСТ 12.0.001-2013, ГОСТ 12.0.003-2015, ГОСТ 12.1.019-2017, ГОСТ 12.2.003-91, ГОСТ 12.1.038-82, ГОСТ 12.3.002-2014 [33-42] и достигается:

- выбором принципов действия, конструктивных схем, безопасных элементов конструкции и т. п.;
- применением в конструкции безопасных материалов, средств автоматизации и дистанционного управления;
- выполнением эргономических и эстетических решений;
- выбором безопасных органов управления;
- применением в конструкции средств защиты;
- соблюдением требований безопасности при эксплуатации, монтажных работах, транспортировании и хранении;
- размещением оборудования на площадке;
- выбором электрооборудования и конструкции оборудования с учетом пожарной безопасности;
- включением требований безопасности в техническую документацию по монтажу, эксплуатации, ремонту, транспортированию и хранению;
- контролем за соблюдением требований безопасности, правил эксплуатации и трудового законодательства по охране труда работающими.

Оборудование манипуляционного робота при эксплуатации и в условиях, установленных эксплуатационной и ремонтной документацией по требованиям ГОСТ 2.601-2013 и ГОСТ 2.602-2013 не должно создавать опасности в чрезвычайных ситуациях в результате воздействия высокой влажности, температуры, солнечной радиации, механических колебаний, перепада давлений, агрессивных веществ, ветровых нагрузок, обледенения и других негативных факторов, которые имеют место при чрезвычайных ситуациях.

8.1 Безопасность элементов манипуляционного робота

Манипуляционный робот включает в себя:

- корпусные и крепежные элементы;
- сервоприводы;
- контроллеры;
- кабели;

- приемники и передатчики беспроводного сигнала.

Все элементы манипуляционного робота не представляют высокой пожарной (ГОСТ 12.1.004) и взрывоопасности (ГОСТ 12.1.010).

Корпусные и крепежные элементы.

Манипуляционный робот содержит корпусные элементы, выполненные из пластика, а также крепежные изделия (винты, гайки).

В соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.019, корпусные и крепежные элементы рассматриваемого манипуляционного робота не представляют высокой электрической опасности, так как корпусные изделия, выполненные из PLA-пластика, не проводят ток, а крепежные элементы не контактируют с токоведущими частями роботов. При этом PLA-пластик является экологически чистым, будучи изготовленным из сахарной свёклы. Массовая концентрация пыли составляет не более 0.07 мг/м^3 , хотя норматив запыленности для офисного помещения составляет 0.50 мг/м^3 . Нормы описаны в документах:

- ГН 2.1.6.1338. «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы» (с.изм. и доп.)
- ГН 2.1.6.1983 05 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Дополнения и изменения N 2к.
- ГН 2.1.6.1338-03» ГОСТ Р ИСО 16000-1-2007 «Воздух замкнутых помещений. Часть 1. Отбор проб. Общие положения» [33-42]

Сервоприводы.

Сервоприводы манипуляционного робота обеспечивают движение звеньев манипулятора.

Сервоприводы обеспечивают безопасность работающих при вводе в эксплуатацию и эксплуатации при соблюдении требований, предусмотренных эксплуатационной документацией. Соответствие требованиям безопасности ГОСТ 12.1.019 и ГОСТ 12.1.038 также обеспечивается следующими свойствами сервоприводов:

- сервоприводы имеют пластиковые корпуса, исключающих контакт работающего с их внутренними частями при нормальном режиме работы;
- максимальное значение напряжения в электрических цепях сервоприводов – 6 В, что, не превышает предельного значения напряжения прикосновения постоянного тока при нормальном режиме электроустановки – 8 В;
- элементы конструкции сервоприводов не имеют острых углов, кромок, заусенцев и поверхностей с неровностями, представляющих опасность травмы работающих;
- конструкция сервопривода исключает самопроизвольное ослабление или разъединение креплений сборочных единиц и деталей за счёт

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист 59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- их надёжного крепления.

Контроллер.

Контроллер получает электрическую энергию от блока питания, которой снабжают сервоприводы, датчики и приёмники беспроводного сигнала, а также осуществляют управление и обмен информацией с ними.

Контроллер обеспечивает безопасность работающих при вводе в эксплуатацию и эксплуатации при соблюдении требований, предусмотренных эксплуатационной документацией. Соответствие требованиям безопасности ГОСТ 12.1.019 и ГОСТ 12.1.038 также обеспечивается следующими свойствами контроллеров:

- контроллер имеет пластиковые корпуса, исключающих контакт работающего с их внутренними частями при нормальном режиме работы;
- максимальное значение напряжения в электрических цепях контроллера – 12 В, что в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.038 не превышает предельно допустимого напряжения прикосновения продолжительностью в 1 с и более при аварийном режиме работы электроустановки;
- элементы конструкции контроллера не имеют острых углов, кромок, заусенцев и поверхностей с неровностями, представляющих опасность травмы работающих;
- конструкция контроллера исключает самопроизвольное ослабление или разъединение креплений сборочных единиц и деталей за счёт их надёжного крепления.

Кабели.

В комплектах имеются двух-, и трёхжильные кабели питания и связи. Электрическая безопасность при обращении с кабелями обеспечивается следующими их свойствами:

- наличие рабочей изоляции;
- максимальное значение напряжения между жилами кабелей, кроме кабелей питания, составляет 5 В, что, согласно требованиям ГОСТ 12.1.038, не превышает предельного значения напряжения прикосновения постоянного тока при нормальном режиме электроустановки – 8 В;
- напряжение между жилами кабелей питания манипуляционного робота составляет 12 В, что в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.038 не превышает предельно допустимого напряжения прикосновения продолжительностью в 1 с и более при аварийном режиме работы электроустановки;
- концы проводов снабжены соединителями, исключающих возможность самопроизвольного короткого замыкания.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

Приемники и передатчики беспроводного сигнала.

Все приёмники и передатчики беспроводного сигнала используют постоянный ток с напряжением не более 5 В, что, согласно требованиям ГОСТ 12.1.038, не превышает предельного значения напряжения прикосновения постоянного тока при нормальном режиме электроустановки – 8 В.

8.2 Безопасность исходных материалов

Безопасность манипуляционного робота обеспечивается использованием в конструкции преимущественно безопасных материалов и веществ. Согласно требованиям ГОСТ 12.3.002:

- материалы манипуляционного робота не оказывают вредного действия на работающих. При использовании материалов, которые могут оказывать вредное воздействие, предусмотрены соответствующие средства защиты работающих;
- использование новых веществ и материалов разрешено только после утверждения в установленном порядке соответствующих гигиенических нормативов.

Таблица 8.1 – Материалы, входящие в состав элементов манипуляционного робота

Наименование материала	Класс опасности
Инженерный PLA-пластик (корпусные элементы, редукторы сервоприводов, корпуса датчиков и контроллера)	4
Сталь (крепежные изделия)	4
Медь (кабели питания и связи)	4
Стеклотекстолит, фольга, полупроводниковые материалы и др. (печатные платы и электронные схемы бортовых контроллеров, сервоприводов и датчиков)	4

Все вещества и материалы прошли гигиеническую проверку и поверку на пожароопасность. Материалы конструкции оборудования (таблица 8.1) не оказывают опасного и вредного воздействия на организм человека и не создают пожаровзрывоопасные ситуации при выполнении предусмотренных условий эксплуатации.

8.3 Безопасность органов управления

Конструкции органов управления роботом обеспечивает оптимальные условия труда и была выполнена в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.064, ГОСТ 12.2.061, ГОСТ 12.2.003:

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

- органы управления имеют средства экстренного (аварийного) выключения;
- расстояние между органами управления исключает возможность изменения положения органа управления при манипуляции со смежным органом управления.

8.4 Безопасность средств защиты, входящих в конструкцию

Средства защиты обеспечивают безопасность при эксплуатации манипуляционного робота и сконструированы с учетом требований ГОСТ 12.2.003, ГОСТ 12.2.049, ГОСТ 12.2.061:

- средства защиты выполняют свое назначение непрерывно в процессе функционирования элементов манипуляционного робота или при возникновении опасной ситуации;
- конструкция и расположение средств защиты не ограничивает технологические возможности оборудования, и обеспечивают удобство эксплуатации и технического обслуживания.

8.5 Безопасность при монтажных и ремонтных работах

Безопасность при монтажных и ремонтных работах обеспечивается средствами защиты, инструментами и приспособлениями, которые удовлетворяют требованиям соответствующих государственных стандартов.

Средства защиты, инструменты и приспособления подвергаются осмотру и испытаниям.

К обслуживанию изделия допускаются лица, прошедшие специальный инструктаж и изучившие данное техническое описание и инструкцию по эксплуатации.

При монтаже и эксплуатации должны соблюдаться:

- правила устройства электроустановок;
- правила технической безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей.

8.6 Безопасность при транспортировке и хранении

Масса робота не превышает 3 кг, поэтому ему не нужны грузоподъемные средства в процессе монтажа, транспортировки, хранения и ремонта.

Требуемое условие хранения – температурный режим (от -10 до +40 °С) и относительная влажность 40-60%. Робот располагается на подставке из ДСП и транспортируется в коробке строго в вертикальном положении.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

8.7 Безопасность при размещении

Согласно требованиям, ГОСТ 12.3.002, СНиП 31-01-03:

- лабораторные (рабочие, монтажные) площадки, на которых выполняются работы, соответствуют требованиям действующих строительных норм и правил, а также правил, утвержденных органами государственного надзора;
- организация рабочих мест отвечает требованиям безопасности с учетом эргономических требований, устанавливаемых в государственных стандартах на конкретные производственные процессы, производственное оборудование и рабочие места.

8.8 Требования безопасности к профессиональному отбору

К обслуживанию допускаются лица:

- прошедшие инструктаж, обучение и проверку знаний по охране труда;
- не имеющие медицинских противопоказаний.

8.9 Пожарная безопасность

Пожарная безопасность оборудования должна быть обеспечена в соответствии с требованиями настоящих стандартов, ГОСТ 12.1.004, ГОСТ 12.1.018, ПУЭ, ПТЭ, и ПТБ, СНиП 3.05.06, СНиП 3.05.07. С учётом этих показателей выбран тип исполнения, вид взрывозащиты электрооборудования и степень его защиты от пыли и влаги.

Для обеспечения пожарной безопасности объекта, где предполагается работа с манипуляционным роботом, необходимо использовать мероприятия пожарной профилактики:

- организационные (инструктаж персонала, разработка плана эвакуации и т.д.);
- технические (устройство не горючих перегородок);
- режимные (курение и прием пищи в специальных местах);
- эксплуатационные (профилактические осмотры).

8.10 Контроль выполнения требований безопасности

Контроль над выполнением требований безопасности при эксплуатации манипуляционного робота возлагается на должностные лица в соответствии с правовыми и нормативными документами по созданию безопасности и нормальных условий труда.

8.11 Безопасность при чрезвычайных ситуациях

При возникновении ЧС необходимо:

- 1) отключить электропитание в лаборатории;

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

- 2) выполнить предписание должностных инструкций;
- 3) покинуть здание и поступить в распоряжение начальника ГО и ЧС.

8.12 Экологическая безопасность манипуляционного робота

Одним из экологических показателей является экологическая безопасность исходных материалов и веществ, входящих в конструкцию оборудования. При изготовлении и эксплуатации манипуляционного робота выполнены все нормативные природоохранные требования. В конструкции применены преимущественно безопасные и экологичные в соответствии со стандартами ССБТ и охраны окружающей среды, сертифицированные материалы и вещества, прошедшие гигиеническую проверку и проверку на пожароопасность.

8.13 Выводы по разделу

В проекте разработан комплекс организационных, технических и других мероприятий, направленных на обеспечение безопасности труда. Внедрение в лабораторию манипуляционного робота и мероприятий с соблюдением требований ГОСТ, СНиП позволит считать данный проект относительно безопасным и экологичным.

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

9 Дальнейшее развитие проекта

Планетарная передача

Добавление планетарной передачи увеличит точность позиционирования за счет разности угловых скоростей солнечной шестерни и сателлитов при неподвижной коронной шестерне.

$$\omega_{\text{солнечной_шестерни}} < \omega_{\text{сателлитов}} \quad (9.1)$$

Техническое зрение на схвате и экстремальный регулятор позволят изменить вид управления на адаптивный, т.е. с учетом препятствий: будь это человек или другой робот.

Программирования через обучение можно достигнуть управления жестами, используя сенсоры на руке оператора или, что дешевле и удобнее, смартфон с гироскопом. Написать интерфейс можно на Java, Jython, либо C (по уровню популярности). Второй по скорости исполнения не уступает Java.

Подобрать более мощные и качественные сервоприводы, в которых:

- приводы полного вращения на 360 градусов;
- вращение валов будет происходить синхронно;
- выше точность позиционирования;
- будет совместимость по положению вала;
- фактические углы вращения будут соответствовать заявленным;
- люфты будут меньше, либо отсутствовать.

Противовес в виде блока позволит снизить нагрузку на первое и последующие звенья.

Исполнение из металла позволит избавиться от люфтов и добавить планетарные редукторы. *Недостаток:* нет ресурсов, опыта и времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломного проекта по теме «Проектирование робота–манипулятора » был получен практический опыт по работе с реверс-инжинирингом, проектированием, конструированием, оформлением чертежей согласно СТО, сборкой и наладкой манипуляционного робота.

Т.к. в ходе проектирования манипуляционного робота, 3d-принтер тоже представлял из себя объект изучения, то были получены теоретические и практические знания его сборки, работы всех его компонентов, а также наладочный опыт устранения проблем е. Также произведена его модернизация для наилучшего качества печати деталей манипуляционного робота.

При печати деталей робота приходилось учитывать термоусадку и проектировать компьютерные 3D-модели с её учетом. Опытным путём удалось добиться наилучшего результата: по горизонтали – 1мм, по вертикали – ее практически нет. Также потребовалось отдельно перепроектировать 3D-модели для последующего прочностного анализа всей сборки в САПР КОМПАС-3D.

При подборе электронных компонентов определялся критерий для каждого из них исходя из расчетов.

Эксперименты помогли убедиться в работе робота: он неплохо держит позицию, но есть погрешности связанные с низким качеством сервоприводов, их несинхронностью, которая увеличивает нагрузку на приводы и низком точностью позиционирования.

Получив наилучшие результаты при минимальном бюджете, сформулировано дальнейшее развитие проекта, описанное в главе 9.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лекции по дисциплине «Основы мехатроники и робототехники» / доц. Ткачев Н.Н.
2. Методическое пособие «Проектирование мехатронных и робототехнических систем» / доц. Сочнев А.Н.
3. Mohsen Shahinpoor A Robot Engineering Textbook / М. Шахинпур Курс робототехники / Перевод с английского С.С. Дмитриева под редакцией технических наук С.Л. Зенкевича английского – М.: Мир, 1990. – 527 с.
4. Что такое Слайсер? [электронный ресурс]. Режим доступа:
<https://3dexperts.userecho.com/knowledge-bases/2/articles/126-chto-takoe-slayser>
5. Сервопривод и шаговые двигатели [электронный ресурс]. Режим доступа:
https://kipservis.ru/kipia_primenenie/servoprivod_i_shagovie_dvigateli.htm
6. Выбор: шаговые двигатели или сервоприводы [электронный ресурс]. Режим доступа:
<https://darxton.ru/wiki-article/vybor-shagovye-ili-servodvigateli/>
7. Сервоприводы [электронный ресурс]. Режим доступа:
<https://arduinomaster.ru/motor-dvigatel-privod/servoprivody-arduino-sg90-mg995-shema-podklyuchenie-upravlenie/>
8. Семь популярных сервоприводов для роботов [электронный ресурс]. Режим доступа:
http://nanojam.ru/news/7_populyarnih_privodov_dlya_robotov
9. Принцип работы сервоприводов [электронный ресурс]. Режим доступа:
https://academy.evolvevector.ru/index.php?route=product/product&product_id=73
10. Сервоприводы [электронный ресурс]. Режим доступа:
<http://wiki.amperka.ru/робототехника:сервоприводы>
11. Сервоприводы [электронный ресурс]. Режим доступа:
<http://zelectro.cc/servosDistinction>

12. Понижающий преобразователь XL4016 [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.jewelfox.ru/lot.php?id=8242>
13. Понижающие преобразователи[электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/432778/>
14. 16 канальный ШИМ-сервоприводный I2C [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://micro-pi.ru/pca9685-16-канальный-pwm-servo-i2c/>
15. Технологии 3D-печати [электронный ресурс]. Режим доступа: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/
16. NEMA step-motor [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.aliexpress.com/item/32823911368.html>
17. 3D-printer noise[электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dprinting.stackovernet.com/ru/q/1644>
18. Регулировка тока на шаговых двигателях A4988 [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/questions/regulirovka-toka-na-shagovykh-dvigatelyakh-a4988-/#76101>
19. Не работают двигатели Prusa i3 [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/questions/ne-rabotayut-dvigateli-prusa-i3-tronxy/>
20. Marlin 116 on Anet A8-A6 [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/andybig/marlin-116-on-anet-a8-a6/>
21. Пришивки Anet A8[электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/questions/proshivka-anet-a8-/>
22. Firmware of printer Anet A8 version 20 [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/maxwell2010/the-firmware-of-the-printer-anet-anet-a6-version-v20/>
23. Please, help experts, not working Z-axis [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/questions/please-help-experts-not-working-zaxis/>
24. Различия между ABS и PLA для 3Д-печати [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rusabs.ru/blogs/blog/razlichie-mezhdu-abs-i-pla-dlya-3d-pechati>

25. Подробный гид по выбору пластика для 3Д-печати [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlja-3d-pechati.html#sbs>
26. Е.И. Юревич Основы робототехники: учеб. пособие – 3-е издание, перераб. и доп. – СПб.Ж БХВ-Петербург,2010. – 368 с.
27. К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли Робототехника: Перевод с английского – М.: Мир, 1989. – 624 с.
28. Arduino Mega 2560 [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardMega2560>
29. Промышленные роботы и манипуляторы [электронный ресурс]. Режим доступа:
http://cncnc.ru/documentation/theory_of_mechanismus_and_machines/lect_19.htm
30. Arduino Mega 2560 на базе микроконтроллера ATmega2560 [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arduinoplus.ru/arduino-mega-2560>.
31. Макаров И.М., Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 576 с.
32. MATLAB.Exponenta [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru>.
33. Безопасность и экологичность проекта: метод. указания / сост.: Т. В. Игнатенко. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 40 с.
34. Федеральный закон № 123 от 22.07.2008 г. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
35. ГОСТ 12.0.001 ССБТ. Основные положения.
36. ГОСТ 12.0.003 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы классификации.
37. ГОСТ 12.0.004 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения.
38. ГОСТ 12.1.004 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

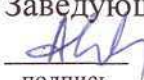
39. ГОСТ 12.1.007 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
40. ГОСТ 12.1.010 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.
41. ГОСТ 12.1.018 ССБТ. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования.
42. ГОСТ 12.1.019 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
43. ГОСТ 12.1.040 Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность. Общие положения.
44. ГОСТ 12.2.003 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
45. ГОСТ 12.2.049 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.
46. ГОСТ 12.2.061 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам.
47. ГОСТ 12.2.064 ССБТ. Органы управления производственным оборудованием. Общие требования безопасности.
48. ГОСТ 12.3.002 ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности.
49. ГОСТ 2.601 ЕСКД. Эксплуатационные документы.
50. ГОСТ 2.602 ЕСКД. Ремонтные документы.
51. СНиП 3.05.06 Электротехнические устройства.
52. СНиП 3.05.07 Системы автоматизации.
53. СТО СТО 4.2-07-2014С тандарт организации «Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности» - К.: СФУ, 2014 – 60 с.
54. Опасность 3д-печати [электронный ресурс]. Режим доступа:
<https://3dtoday.ru/blogs/rec/the-dangers-of-3d-printing-mystery-solved-3-part-one/>

55. Принципы объектно-ориентированного программирования
[электронный ресурс]. Режим доступа:
<https://devionity.com/ru/courses/php-oop/php-incapsulation-polymorphism-inheritance>

					БР – 15.03.06 ПЗ	Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
Кафедра «Робототехника и техническая кибернетика»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
 А. Н. Сочнев
подпись
« 08 » « 07 » 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

15.03.06 Мехатроника и робототехника
Проектирование робота-манипулятора

Руководитель


подпись, дата


должность, учёная степень

Ю.Г. Голых

Выпускник


подпись, дата

Ч. А. Бартан

Нормоконтролёр


подпись, дата

09.07.19г.

В. Н. Куликова

Красноярск 2019