

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра

«Промышленная электроника»

(наименование)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки/специальности)

Электроника и робототехника

(направленность (профиль) специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Разработка электропривода для промышленного робота-манипулятора

Обучающийся

Д.С. Волчков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, М.В. Позднов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

И.Ю. Усатова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

## **Аннотация**

Название выпускной квалификационной работы: «Разработка электропривода для промышленного робота-манипулятора».

Выпускная квалификационная работа (ВКР) состоит из введения, шести глав, 38 рисунков, 2 таблиц, заключения, списка используемой литературы из 20 источников, включая иностранные.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка электропривода промышленного робота-манипулятора, а также запуск бюджетного и общедоступного массового производства промышленных манипуляторов.

Объектом выпускной квалификационной работы является разработка уникального шести-осевого промышленного робота-манипулятора.

Предметом выпускной квалификационной работы является разработка электропривода для управления промышленным роботом-манипулятором.

Ключевым вопросом выпускной квалификационной работы является подбор и выбор сервоприводов и платы контроллера для нормального функционирования робота-манипулятора, составление электрической схемы.

Дипломную работу можно разделить на несколько логически связанных частей: постановка задач, которые будет выполнять робот-манипулятор, проектирование манипулятора, разработка электропривода, сборка робота, осуществление управления и испытания робота-манипулятора.

В первой части описана постановка задач, где указываются все необходимые узлы робота, какая цель движет при создании манипулятора и задачи, которые необходимо выполнить в процессе изготовления робота. Также приведен анализ доступных промышленных роботов-манипуляторов на Российском рынке.

Во второй части описаны проектирование робота-манипулятора и всех его узлов, где большее внимание уделялось разработке циклоидальных редукторов.

Третья часть состоит из разработки электрической части промышленного робота-манипулятора, где были определены и выбраны шесть сервоприводов и драйверов и плата контроллера esp32 для управления всей электроникой. В четвертой части описана изготовление и сборка узлов, корпуса и самого робота-манипулятора.

В пятой части описывается с помощью чего и как осуществляется управление промышленным роботом-манипулятором.

Шестая часть состоит из испытаний и тестов, проводимых после полной сборки робота-манипулятора с целью выявления и устранения дефектов.

В заключение мы хотели бы подчеркнуть, что по результатам испытаний промышленный робот-манипулятор показал себя хорошо, учитывая тот факт, что все его узлы собраны и изготовлены из пластика.

Работа представляет интерес для предприятий с малым капиталом, что даёт возможность малым предприятиям покупать бюджетные и качественные промышленные роботы-манипуляторы.

## **ABSTRACT**

The title of the graduation work is «Development of an electric drive for an industrial robot arm».

The graduation work consists of an introduction, six chapters, 38 figures, 2 tables, conclusions, and a list of references from 20 sources, including foreign ones.

The aim of this graduation work is to develop an electric drive for an industrial robot manipulator, as well as to launch low-cost and publicly available mass production of industrial manipulators.

The object of the graduation work is the development of a unique six-axis industrial robot arm.

The subject of the graduation work is the development of an electric drive for controlling an industrial robot arm.

The key issue of the graduation work is the selection of servos and controller boards for the normal functioning of the robot arm, and the preparation of an electrical circuit.

The graduation work may be divided into several logically connected parts with are setting tasks that will be performed by a robotic arm, designing a manipulator, developing an electric drive, assembling a robot, controlling and testing a robotic arm.

The first part describes in details the task statement, which specifies all the necessary components of the robot, what drives the purpose of creating the manipulator and the tasks that need to be completed during the manufacturing process of the robot. An analysis of available industrial robot manipulators on the Russian market is also provided.

The second part describes the design of the robot arm and all its components, where more attention was paid to the development of cycloidal gearboxes.

The third part consists of the development of the electrical part of an industrial robot arm, where six servos and drivers and an esp32 controller board were identified and selected to control all electronics.

The fourth part describes the manufacture and assembly of components, the body and the robot arm itself.

The fifth part describes how and with what help an industrial robot manipulator is controlled.

The sixth part consists of tests and tests conducted after the complete assembly of the robot arm in order to identify and eliminate defects.

In conclusion we`d like to emphasize that according to the test results, the industrial robot arm performed well, given the fact that all its components are assembled and made of plastic.

The work is of interest to enterprises with small capital, which makes it possible for small enterprises to buy low-cost and high-quality industrial robot manipulators.

## Содержание

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                              | 7  |
| 1 Постановка задач и аналоги .....                          | 9  |
| 1.1 Формулировка задач .....                                | 9  |
| 1.2 Анализ известных решений .....                          | 12 |
| 2 Проектирование устройства .....                           | 18 |
| 2.1 Моделирование робота-манипулятора .....                 | 18 |
| 2.2 Проектирование редукторов.....                          | 20 |
| 2.3 Проектирование ременных передач .....                   | 28 |
| 2.4 Проектирование рабочего приспособления .....            | 31 |
| 3 Разработка электропривода.....                            | 34 |
| 3.1 Выбор приводов .....                                    | 35 |
| 3.2 Выбор платы управления .....                            | 37 |
| 3.3 Проектирование электрической принципиальной схемы ..... | 38 |
| 4 Сборка робота-манипулятора .....                          | 41 |
| 4.1 Изготовление корпуса .....                              | 41 |
| 4.2 Изготовление и сборка редукторов .....                  | 42 |
| 4.3 Изготовление ременных передач.....                      | 43 |
| 4.4 Сборка робота-манипулятора .....                        | 44 |
| 5 Управление роботом-манипулятором .....                    | 49 |
| 6 Испытания промышленного робота-манипулятора .....         | 51 |
| Заключение .....                                            | 54 |
| Список используемой литературы .....                        | 56 |
| Приложение А Технические характеристики сервоприводов ..... | 59 |
| Приложение Б Спецификация .....                             | 60 |

## **Введение**

Современная промышленность в России набирает стремительный рост автоматизации производственных процессов. Роботы-манипуляторы являются важным элементом автоматизированных производственных линий, позволяющим повысить производительность, снизить себестоимость и тем самым улучшить качество продукции.

Актуальность данной темы выпускной квалификационной работы является необходимостью современных производств в роботах-манипуляторах с целью автоматизации, качества и экономичности.

Разработка электропривода управления промышленного робота-манипулятора может служить прототипом для создания промышленных образцов роботов, используемых в различных отраслях промышленности.

В зависимости от специфики, манипуляторы используются в разных отраслях промышленности и выполняют разные задачи. Но все они призваны улучшить условия труда работников и снизить расходы предприятия.

Роботы-манипуляторы — решение для тех сфер, в которых часто случаются ошибки из-за человеческого фактора. Там, где человеку не хватает скорости реакции или существуют опасные условия, приходит на помощь робот.

Манипуляторы нашли применение в следующих отраслях:

- автомобильная промышленность: используют для литья, штамповки, сварки, переноса грузов, установки деталей, сборки кузова и других работ. Роботы-манипуляторы в машиностроении обеспечивают непрерывное производство. Использование роботов-манипуляторов в этой сфере позволяет выполнять одновременно несколько задач быстро и точно;
- электротехника, электроника: в этой сфере важна точность, скорость, умение работать с мельчайшими деталями. Рука робота-манипулятора не дрогнет и выполнит задачу быстрее, чем это сделали бы люди;

– строительство: помогают строить здания, ориентируясь на информационную модель. Это помогает избежать ошибок установки, ускорить процесс строительства, уменьшить количество отходов.

К тому же с помощью манипуляторов можно строить сложные геометрические формы;

– химическая промышленность: это сфера контакта с опасными веществами. Внедрение роботов-манипуляторов в химическую промышленность минимизирует участие людей в процессах производства.

В сферах, где присутствие человека обязательно, используются специальные коллаборативные роботы, которые взаимодействуют с работниками;

– медицина и фармацевтика: здесь тоже используются коллаборативные роботы-манипуляторы, которые помогают врачам проводить сложные операции. Такие манипуляторы обычно сверхчувствительные, имеют биосовместимое покрытие.

Также часто используются манипуляторы для создания и упаковки фармацевтических препаратов и медицинских инструментов.

Роботы-манипуляторы используются и в других отраслях. Их можно запрограммировать практически на любой ручной труд [8].

Автоматизация производства с помощью роботов-манипуляторов позволит предприятиям увеличить скорость работы, снизить расходы и повысить рентабельность.



## **1. Постановка задач и аналоги**

### **1.1 Формулировка задач**

Механическая подвижная рука управляется при помощи электронной системы. Зачастую в современных устройствах не применяется гидравлика и пневматика, так как такие системы слишком дорогие в эксплуатации и недолговечные. Наиболее важные характеристики руки-манипулятора:

- количество осей. Зачастую у промышленных роботов 4 оси. Такие устройства используются для сортировочных и фасовочных работы. Также манипулятор может иметь 6 осей, если нужно выполнять более сложные работы;

- количество степеней свободы. Их может быть от 2 до 6. Чем больше степеней свободы, тем больше у робота возможностей и тем точнее устройство может повторять движения человеческой руки [2].

Основой для корректной работы робота-манипулятора является программный код, по алгоритму которого он будет выполнять свои задачи. Существует несколько основных способов управления роботами-манипуляторами, каждый из которых имеет свои преимущества и области применения. Выбор способа управления зависит от сложности задачи, требуемой точности, скорости и степени автоматизации.

Способы управления, используемые в роботах-манипуляторах:

- ручное управление – оператор непосредственно управляет движением робота с помощью пульта управления;

- программное управление – робот выполняет заранее запрограммированную последовательность движений;

- адаптивное управление – робот автоматически корректирует свои движения в зависимости от информации, полученной от датчиков (камер, датчиков силы/момента, датчиков приближения);

- интеллектуальное управление – робот использует алгоритмы искусственного интеллекта (нейронные сети, машинное обучение) для принятия решений и управления своими движениями;

- управление на основе зрения – робот использует камеры для визуального восприятия окружающей среды и принятия решений о своих движениях;

- гибридные системы управления – комбинация нескольких способов управления для достижения оптимального результата. Например, ручное управление для обучения траектории и программное управление для ее выполнения [17].

В интернете представлено множество готовых программных решений для управления роботами-манипуляторами, имеющих большой выбор потребностей – от простого управления и программирования до сложного моделирования и анализа. Использование готовых программ позволяет существенно сократить время разработки и снизить затраты на написание программ.

Примеры программ для управления роботами-манипуляторами:

- среды разработки для роботов (Robot Development Environments) – предоставляют комплексные инструменты для разработки, моделирования, программирования и отладки роботизированных систем (ABB RobotStudio, FANUC ROBOGUIDE, KUKA.Sim, Yaskawa MotoSim);

- программы для Управления и Мониторинга (Control and Monitoring Software) – позволяют операторам управлять роботами, контролировать их состояние и собирать данные о производительности;

- программы для специфических приложений (Application-Specific Software) – служат для решения конкретных задач, таких как сварка, покраска, сборка или обработка материалов;

– облачные платформы для робототехники (Cloud Robotics Platforms) – предоставляют инструменты для удаленного управления, мониторинга и анализа роботов через интернет [18].

Разрабатываемый робот-манипулятор должен обладать следующими конструктивными элементами:

- основание, поворачивающееся вокруг своей оси, которое крепится к плоской поверхности;
- два звена - плечо и стрелу;
- универсальное рабочее приспособление, к которому можно прикрепить механические схваты, магнит, сварочное или покрасочное оборудование (в зависимости от задач, которые будет выполнять робот-манипулятор).

Также, манипулятор должен являться шести осевым для выполнения более сложных задач, что даст возможность сделать его универсальным (подъем и перемещение грузов, сварочные работы, окраска и т.д.), а также должен управляться с помощью телефона или компьютера.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка электропривода промышленного робота-манипулятора, а также запуск бюджетного и общедоступного массового производства промышленных манипуляторов.

Задачи:

- спроектировать механическую структуру манипулятора;
- спроектировать корпус;
- спроектировать редукторы;
- спроектировать ременные передачи;
- определиться с выбором электроприводов для робота-манипулятора;

- собрать всю электрическую часть (сервоприводы, драйверы для управления сервоприводами и esp-32) для нормального функционирования робота;
- выбрать или написать программу для управления роботом-манипулятором.

## **1.2 Анализ известных решений**

На данный момент на мировых рынках имеется большое количество роботов-манипуляторов, но все они имеют очень большую стоимость и ограниченный функционал. Поэтому был проведен анализ Российского рынка, где представлены доступные на данный момент манипуляторы.

FANUC M-10iA/12 (рисунок 1) – 6-осевой высокоскоростной промышленный робот с полым запястьем и короткой рукой, большим радиусом действия и полезной нагрузкой 12 кг. M-10iA/12 подходит для работы в ограниченном пространстве, а большая досягаемость и высокая повторяемость позволяют сократить время выполнения технических операций [10].



Рисунок 1 – Промышленный робот M-10iA/12

KUKA KR CYBERTECH nano KR 8 R1420 arc HW (рисунок 2) –6-осевой манипулятор с грузоподъемностью 8 кг и радиусом действия 1420 мм. Оптимизирован для работы в непрерывном режиме, например, для дуговой сварки, нанесения клея или герметика, лазерной резки. Промышленные роботы обладают идеальной мощностью и производительностью, что способствует максимальной экономичности при низких затратах [12].



Рисунок 2 – Промышленный робот KUKA KR CYBERTECH nano KR 8 R1420 arc HW

GSK RB06Q1-1430 (рисунок 3) – Робот-манипулятор с шестью степенями свободы облегченного типа серии RB с более высоким уровнем пыленепроницаемости и влагозащищенности особенно хорошо подходит для задач, требующих от оборудования высокого уровня защищенности, а также в ситуациях, когда высокую скорость работы и качество рабочего цикла необходимо обеспечить в ограниченном пространстве. Промышленный робот такого типа используется для перемещения и укладки заготовок в обрабатывающие центры, жидкостной и порошковой покраски, обслуживания штамповочных станков, сортировки, литейного формирования и т.п. [11].



Рисунок 3 – Промышленный робот GSK RB06Q1-1430

CRP RA18-25 (рисунок 4) – промышленный робот-манипулятор, имеющий длину руки 1835,6 мм и максимальную грузоподъемность 25 кг, что позволяет работать с различными деталями среднего размера и эффективно их обрабатывать. Этот робот подходит для множества операций, включая покраску, сборку, маркировку и резку, что делает его универсальным решением для любых производственных процессов. [9].



Рисунок 4 – Промышленный робот CRP RA18-25

После проделанного анализа над промышленными роботами-манипуляторами, имеющихся в продаже на Российском рынке, была составлена таблица 1, где представлены их технические характеристики и стоимость.

Таблица 1 – Технические характеристики и цены проанализированных промышленных роботов-манипуляторов

| Производитель | Модель           | Рабочий диапазон, мм | Количество осей | Грузоподъемность, кг | Цена, руб |
|---------------|------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------|
| FANUC         | M-10Id/12        | 1441                 | 6               | 12                   | 2 млн     |
| KUKA          | KR8 R1420 arc HW | 1420                 | 6               | 8                    | 3 млн     |
| GSK           | RB06Q1-1430      | 1430                 | 6               | 6                    | 1,2 млн   |
| CRP           | RA18-25          | 1835                 | 6               | 18                   | 4 млн     |



Проанализировав рынок, где представлены доступные промышленные роботы-манипуляторы, можно сделать вывод о том, что они имеют ограниченный функционал и огромную стоимость без учета доставки и установки. Соответственно, в данной работе над проектированием и созданием промышленного робота-манипулятора ставятся следующие цели:

- сделать робот-манипулятор бюджетным для потребителей (малые предприятия с небольшим бюджетом);
- использовать недорогие и легкодоступные компоненты для создания манипулятора.

Поставленные цели позволят вывести разрабатываемый робот-манипулятор на внутренний рынок и сделать его доступным для заказа как для малых, так и для больших предприятий.

## **2. Проектирование устройства**

Проектирование робота-манипулятора является важным действием при его разработке и включает в себя множество разделов, таких как механика, электроника, программирование и системы управления. Успешно спроектированные узлы и детали робота-манипулятора позволяют создать устройство, способное адаптироваться к различным условиям работы, обеспечивать высокую производительность и минимизировать риски, связанные с ошибками или поломками [3].

### **2.1 Моделирование робота-манипулятора**

Для начала, было решено создать модель самого робота-манипулятора (см. рисунок 5) и разработать все узлы и механизмы. В качестве CAD-программы, мною была выбрана программа Siemens NX, в которой есть большой функционал для конструирования и моделирования, что позволило точно определить размеры и формы всех элементов. Были спроектированы конструкция манипулятора, поворотные плечи и различные узлы (редуктора, приводы и ременные передачи), представленные на рисунке 6.

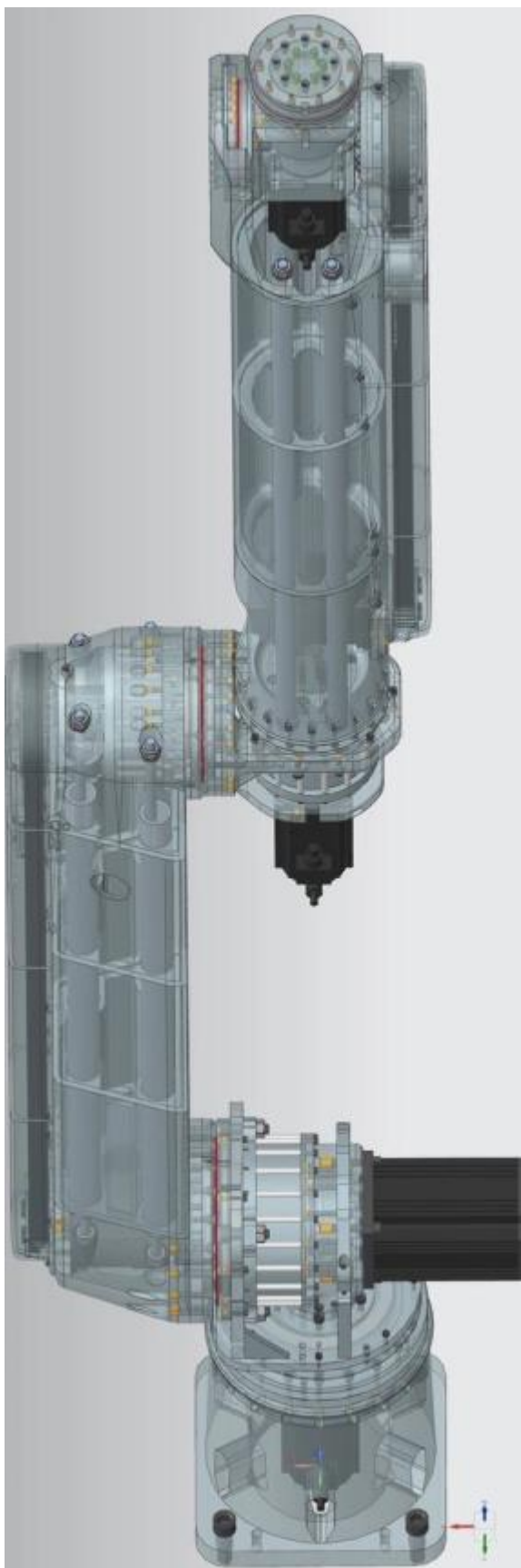


Рисунок 5 – 3D-модель робота-манипулятора

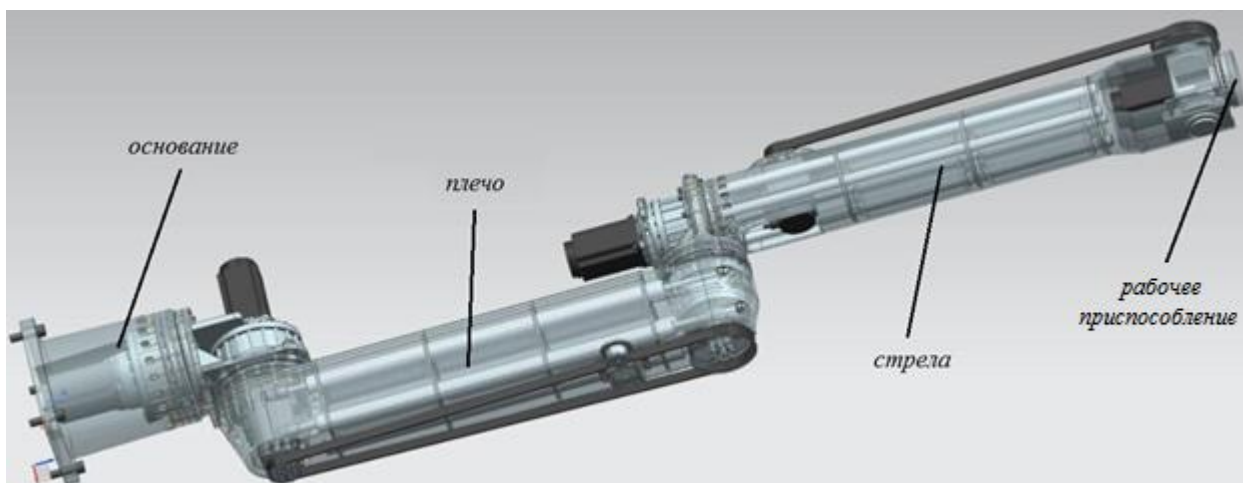


Рисунок 6 – Конструкция робота-манипулятора

## 2.2 Проектирование редукторов

Для повышения крутящего момента и уменьшения скорости сервоприводов были спроектированы редуктора. Редуктора крутят оси в роботах сервоприводы, а у сервоприводов есть характеристики - скорость вращения и момент.

Например, у сервопривода с фланцем 80мм и мощностью 1000 ватт в номинале 2500 об/мин и 3.8 Н\*м, что никуда не годится - слишком быстро и слабо.

Для этого существует редуктор, который переводит скорость вращения в момент силы, если редукция 1к100, то получаем для сервопривода замедление скорости в 100 раз и увеличение момента в 100 раз, т.е. 250 об/мин и 380 Н\*м [7].

В «настоящих» промышленных роботах используют волновые редукторы, они компактные, не имеют люфта и в достаточной мере надёжны, но сложны в изготовлении, особенно в домашних условиях. Альтернативой является циклоидальный редуктор, собранный из подшипников, направляющих, шпилек и шестерен.

Циклоидальный двухступенчатый редуктор (см. рисунок 7) – это механизм, который использует принцип планетарной передачи и циклоидальную зубчатую передачу, обеспечивая два этапа преобразования частоты вращения.



Рисунок 7 – Циклоидальный двухступенчатый редуктор

**Преимущества:**

- большое передаточное отношение при компактных размерах;
- высокий КПД (до 85% для двухступенчатого редуктора) благодаря отсутствию трения скольжения в зацеплении;
- высокая нагрузочная способность, возможность выдерживать большие ударные и пиковые нагрузки;
- малая инерционность, симметричное расположение деталей;
- низкий уровень шума (65–70 дБ) за счёт многопарного зацепления.

**Недостатки:**

– высокие требования к точности изготовления — неточная конструкция может привести к вибрациям и сокращению срока службы редуктора [13].

Циклоидальный редуктор строится по эпитрохоиде (рисунок 8) - плоской кривой, образуемой точкой, жёстко связанной с окружностью, катящейся по внешней стороне другой окружности [14].

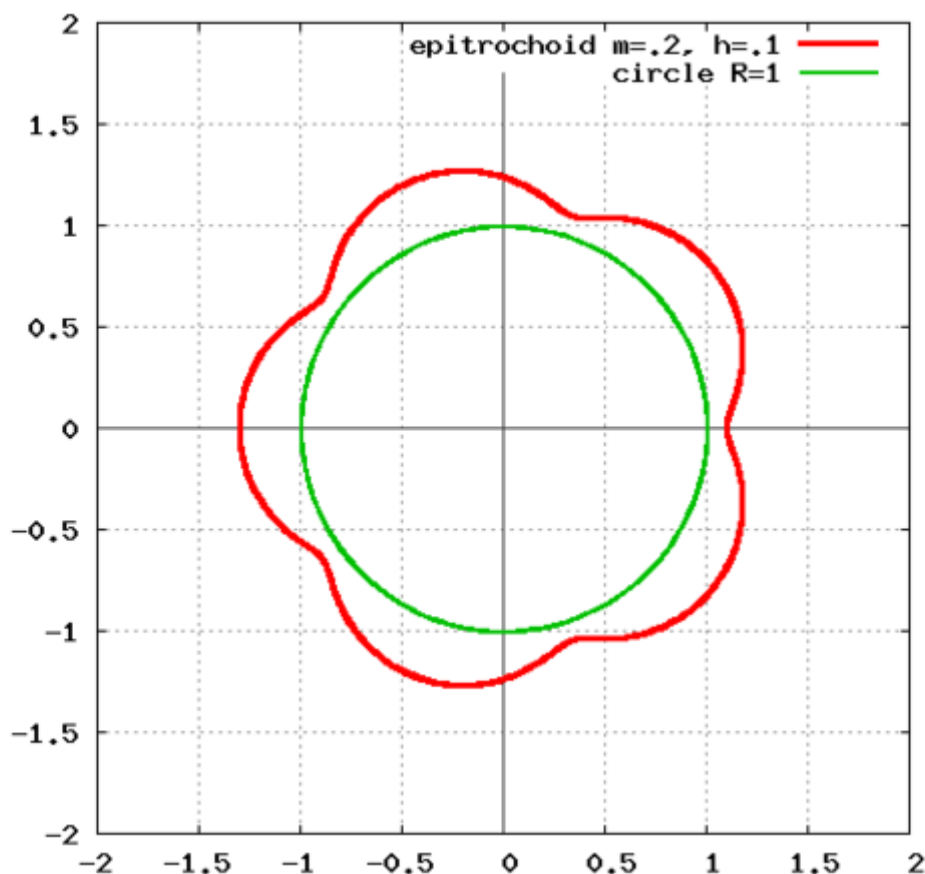


Рисунок 8 – Построение эпитрохоиды

Все проектирования редукторов проходили в CAD-программе Siemens nx по параметрам (рисунок 9) и формулам (рисунок 10).

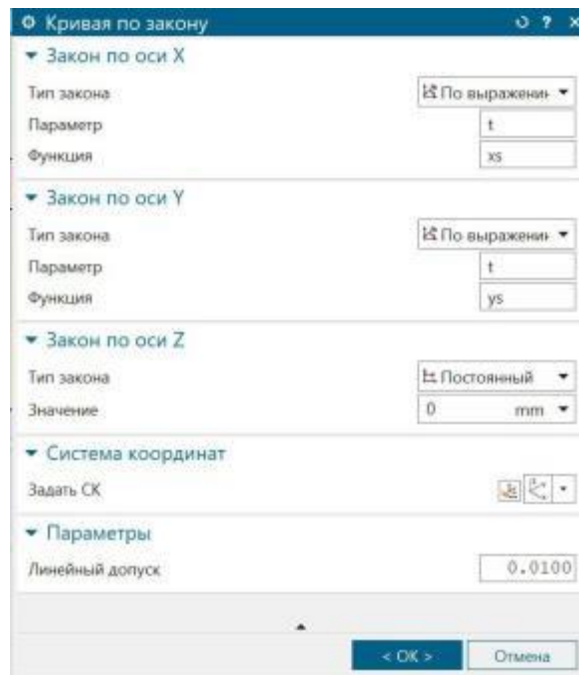


Рисунок 9 – Построение редукторов по параметрам

|                |                                                             |              |    |   |
|----------------|-------------------------------------------------------------|--------------|----|---|
|                |                                                             |              | mm | ▼ |
| D_cr_ring      | $(4*N_{cr}*D_{crown\_shafts})/(2*pi())$                     | 99.31268449  |    |   |
| D_crown_shafts | 6                                                           | 6            | mm | ▼ |
| D_oe           | $(Gear\_ration*D_{cr\_ring})/N_{cr}$                        | 95.49296586  |    |   |
| D_oeo          | $D_{cr\_ring}-D_{oe}$                                       | 3.819718634  |    |   |
| d_output_hole  | 19                                                          | 19           | mm | ▼ |
| d_output_pin   | $d_{output\_hole}-2*e$                                      | 16           | mm | ▼ |
| e              | $D_{crown\_shafts}/4$                                       | 1.5          | mm | ▼ |
| Gear_ration    | 25                                                          | 25           | mm | ▼ |
| N_cr           | $Gear\_ration+1$                                            | 26           | mm | ▼ |
| p0             | e                                                           | 1.5          | mm |   |
| p1             | -e                                                          | -1.5         | mm |   |
| R_oe           | $D_{oe}/2$                                                  | 47.74648293  | mm | ▼ |
| R_oeo          | $D_{oeo}/2$                                                 | 1.909859317  | mm | ▼ |
| R_oe           | 🔒 (транзитивность)                                          | 47.746482... | mm |   |
| R_oeo          | 🔒 (транзитивность)                                          | 1.9098593... | mm |   |
| s              | $0*(1-t)+360*t$                                             | 0            | mm |   |
| t              | 🔒 (транзитивность)                                          | 0            |    |   |
| xs             | $(R_{oe}+R_{oeo})*cos(s)-e*cos((R_{oe}+R_{oeo})/R_{oeo}*s)$ | 48.156342... | mm |   |
| ys             | $(R_{oe}+R_{oeo})*sin(s)-e*sin((R_{oe}+R_{oeo})/R_{oeo}*s)$ | 0            | mm |   |

Рисунок 10 – Построение редукторов по формулам

Циклоидальный редуктор состоит из 4х основных частей:

Циклоидальный диск (рисунок 11) – основной элемент, который имеет специальный профиль зубцов, выполненный по параметрической кривой, диск совершает эксцентрическое движение, передавая вращение на выходной вал. Обычно в конструкциях применяют два диска для взаимного погашения колебаний. Изготавливается 3d печатью.

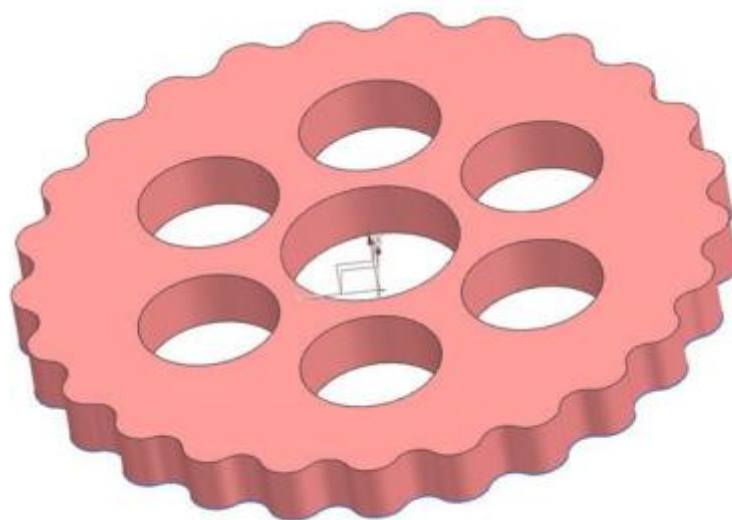


Рисунок 11 – Циклоидальный диск

Эксцентриковый вал (рисунок 12) – одновременно является и входным валом – создаёт эксцентриковое движение, позволяет циклоиду, через подшипники, вращаться с переменным радиусом.



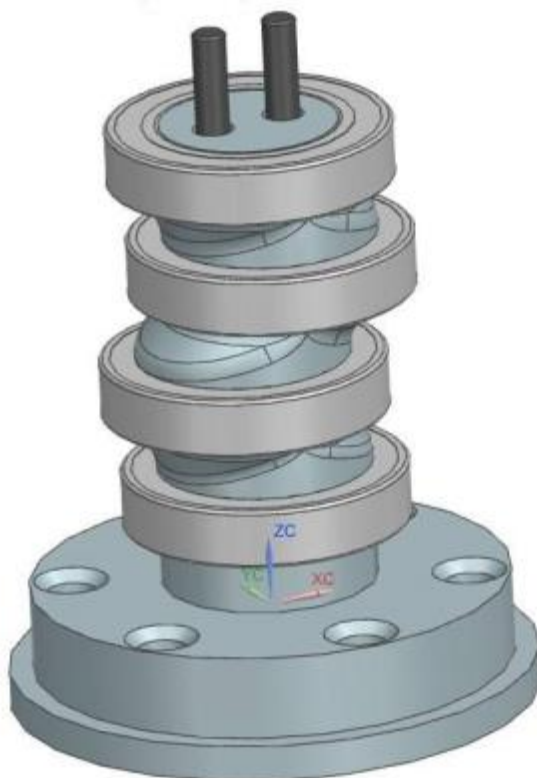


Рисунок 12– Эксцентриковый вал

Выходной вал (рисунок 13) – передаёт вращение от циклоидов к нагрузке. Соединен с дисками через подшипники на осях.



Рисунок 13 – Выходной вал

Коронное кольцо (рисунок 14) – так же является частью корпуса и ответной частью параметрической кривой циклоидального диска – ограничивает движение по необходимой траектории [1].

Изготавливается из пластика с запрессованным штифтами (опционально с втулками на штифтах).

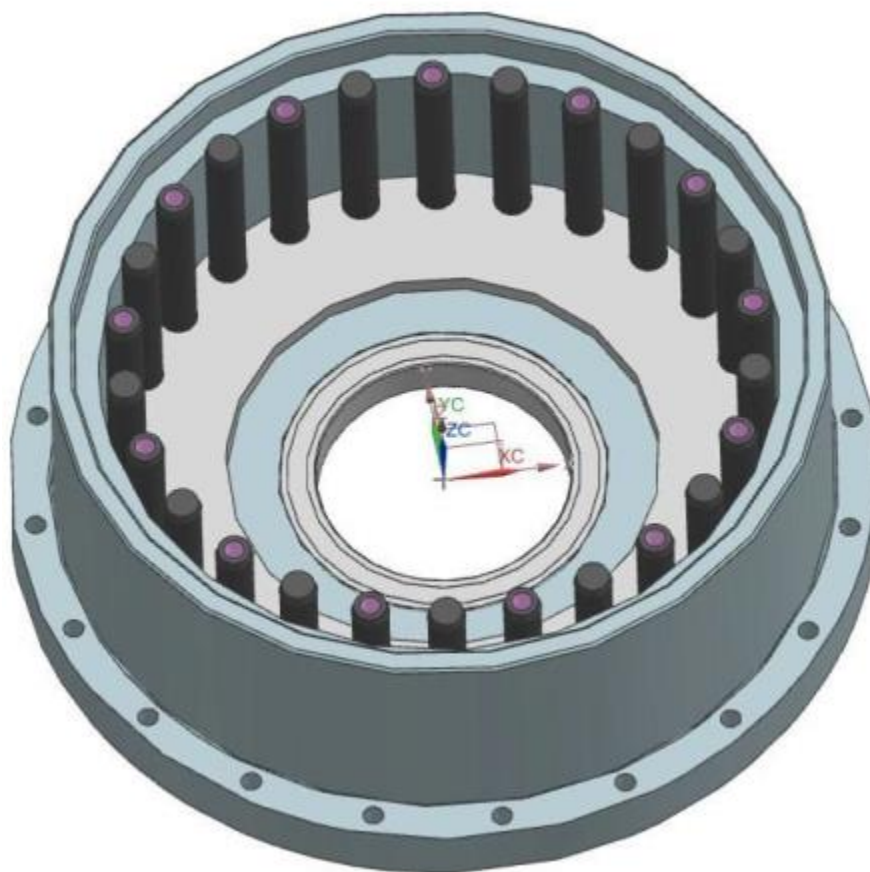


Рисунок 14 – Коронное кольцо

Всего в роботе-манипуляторе будет 6 редукторов, показанные на рисунке 15.

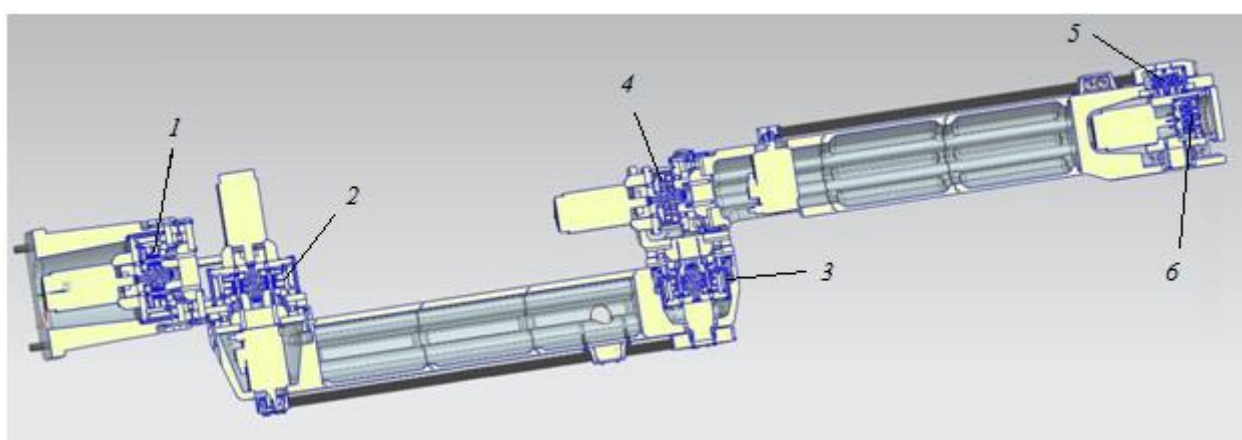


Рисунок 15 – Расположение редукторов в роботе-манипуляторе

Каждый редуктор идет в паре с сервоприводом и имеет свое назначение:

- редуктор 1 находится в основании робота-манипулятора и осуществляет повороты влево и вправо, обеспечивая горизонтальное перемещение;
- редуктор 2 отвечает за подъем и опускание плеча, что позволяет изменять высоту. Осуществляется с помощью ременной передачи;
- редуктор 3 управляет углом наклона плеча относительно корпуса;
- редуктор 4 отвечает за вращение стрелы относительно плеча;
- редуктор 5 осуществляет поворот рабочего приспособления относительно стрелы. Осуществляется с помощью ременной передачи;
- редуктор 6 управляет вращением рабочего приспособления, позволяя ему поворачиваться.

### 2.3 Проектирование ременных передач

Проектирование ременных передач (рисунок 16) – важный этап, влияющий на точность, эффективность и надежность работы для робота-манипулятора, а именно для его передачи движения от двигателя к исполнительным звеньям.

Ременные передачи в роботах-манипуляторах предназначены для преобразования вращательного движения в линейное.

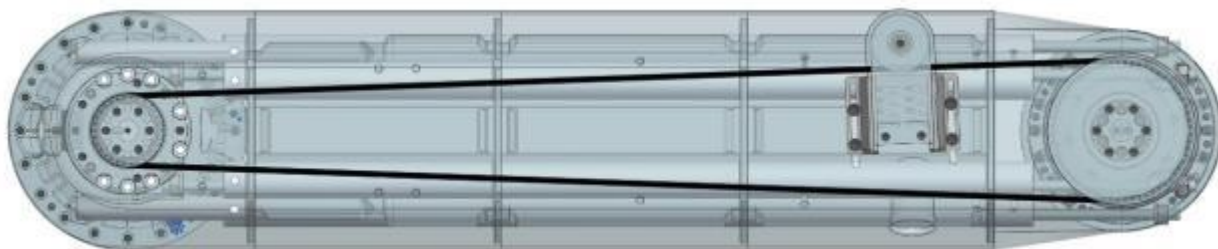


Рисунок 16 – Проектирование ременной передачи

Принцип работы – используется зубчатый ремень, который соединяется между двумя шкивами на каждом конце привода. При вращении мотора шкив передаёт крутящий момент на ремень, заставляя его двигаться параллельно оси привода. Это движение через специальную каретку приводит к перемещению рабочего элемента или инструмента [6].

Ремень содержит зубья, которые входят в зацепление со шкивами для предотвращения проскальзывания.

В манипуляторе будут иметься 2 привода, осуществляющие движение робота по двум ременным передачам (рисунок 17).

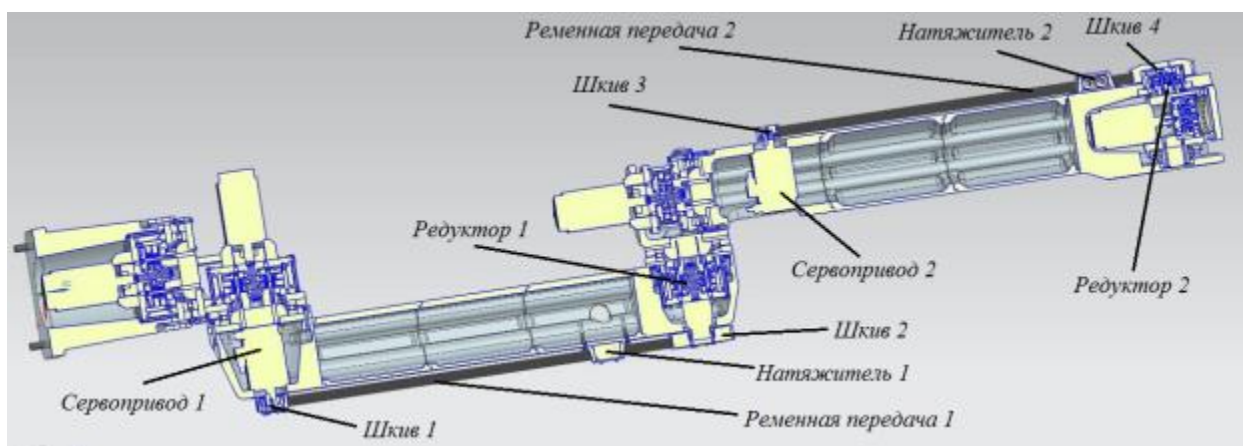


Рисунок 17 – Обозначение ременных передач в роботе-манипуляторе

Ременная передача 1 находится в плече робота-манипулятора. Движение ремня осуществляет сервопривод 1, который находится в основании плеча, приводя в действие шкив 1 и шкив 2, соединенный с редуктором 1 и отвечает за наклон стрелы вверх или вниз.

Ременная передача 2 находится в стреле робота. Здесь движение ремня осуществляет сервопривод 2, который приводит в действие шкив 3 и шкив 4, соединенный с редуктором 2 и отвечает за поворот рабочего приспособления.

Также, для каждого ремня спроектированы натяжители (рисунок 18), которые не дают ремню растягиваться и проскальзывать, создавая жесткое

сцепление со шкивами. Натяжитель 1 и натяжитель 2 являются одинаковыми. Натяжитель ремня состоит из ролика (1), блока пружин (2) и корпуса (3).

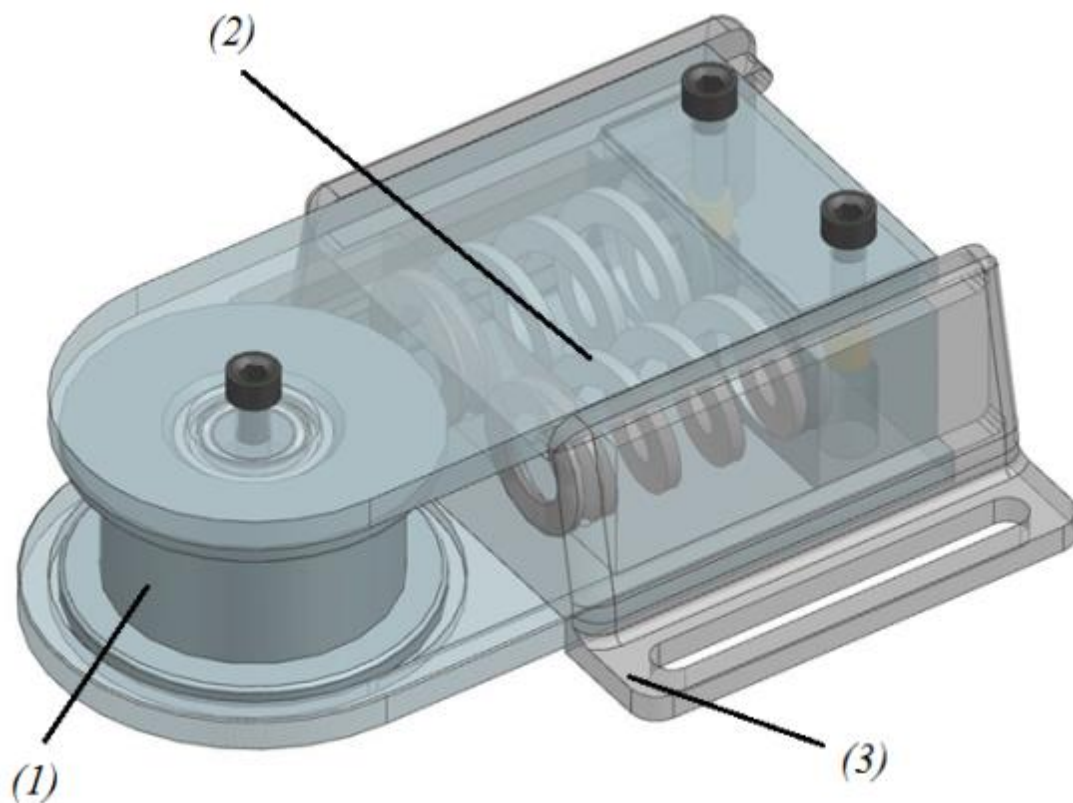


Рисунок 18 – Проектирование натяжителей ремня

Процесс проектирования зубьев шкива показан на рисунке 19.

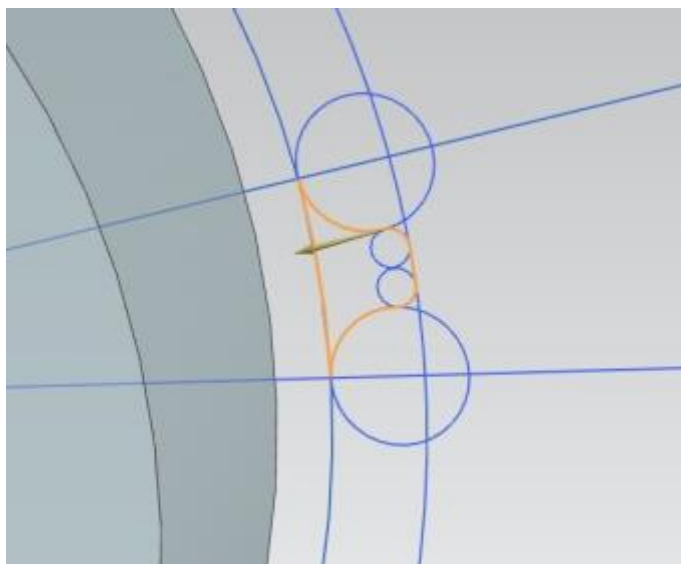


Рисунок 19 – Проектирование шкива

Шкивы для ременных передач были спроектированы в Siemens nx в соотношении 1:2.

## **2.4 Проектирование рабочего приспособления**

Еще одна немало важная часть для проектирования робота-манипулятора - это рабочее приспособление, к которому можно будет прикрепить магнит, схват, сварочное или покрасочное оборудование, в зависимости от сферы работы и задач, где будет эксплуатироваться манипулятор.

Рабочее приспособление должен двигаться относительно стрелы, а также вращаться, позволяя ему поворачиваться (рисунок 20).



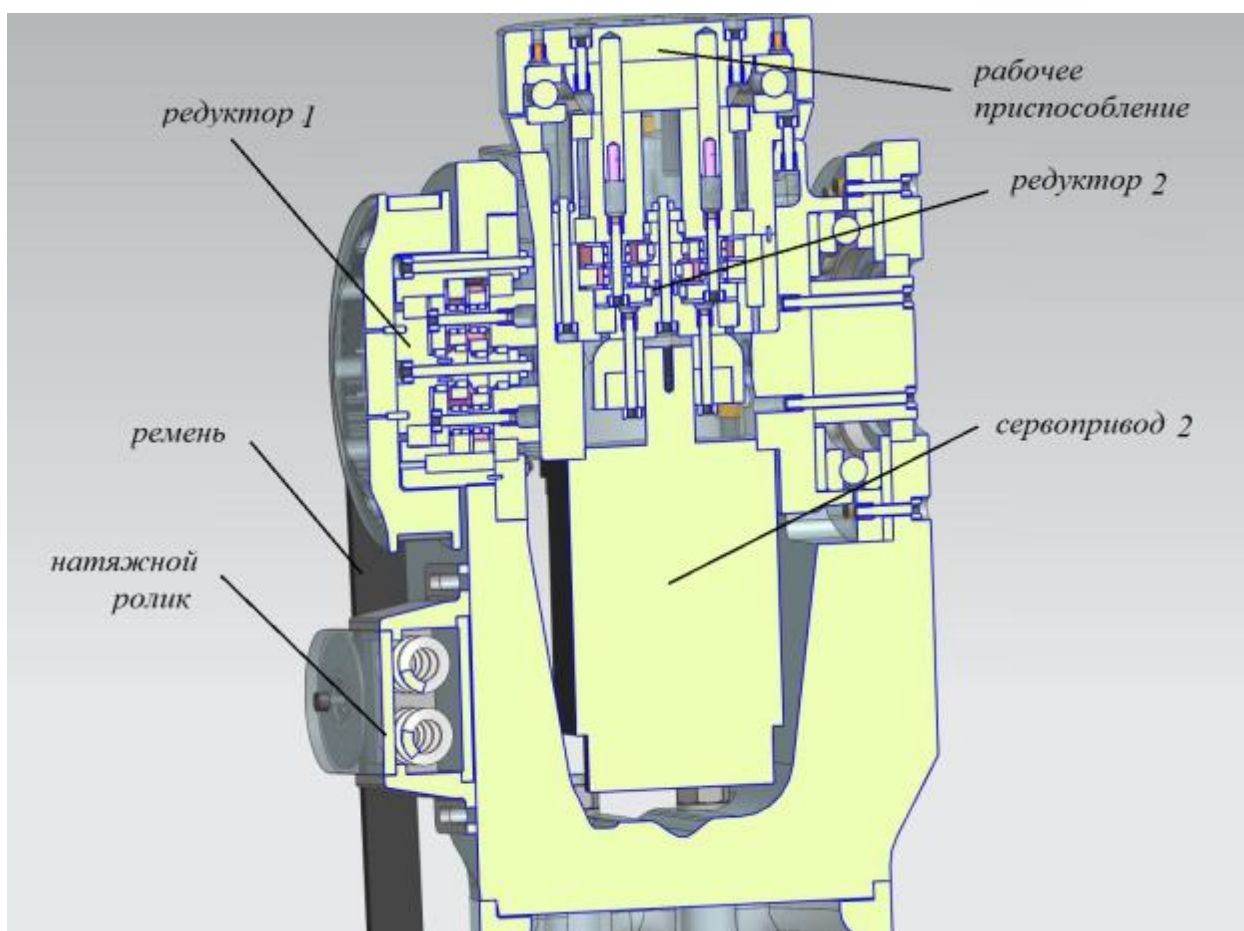


Рисунок 20 - Органы, осуществляющие вращение рабочего приспособления

Движение рабочего приспособления относительно стрелы приводится в действие с помощью ременной передачи, редуктора 1 посредством сервопривода 1 (рисунок 21), находящегося в основании стрелы.



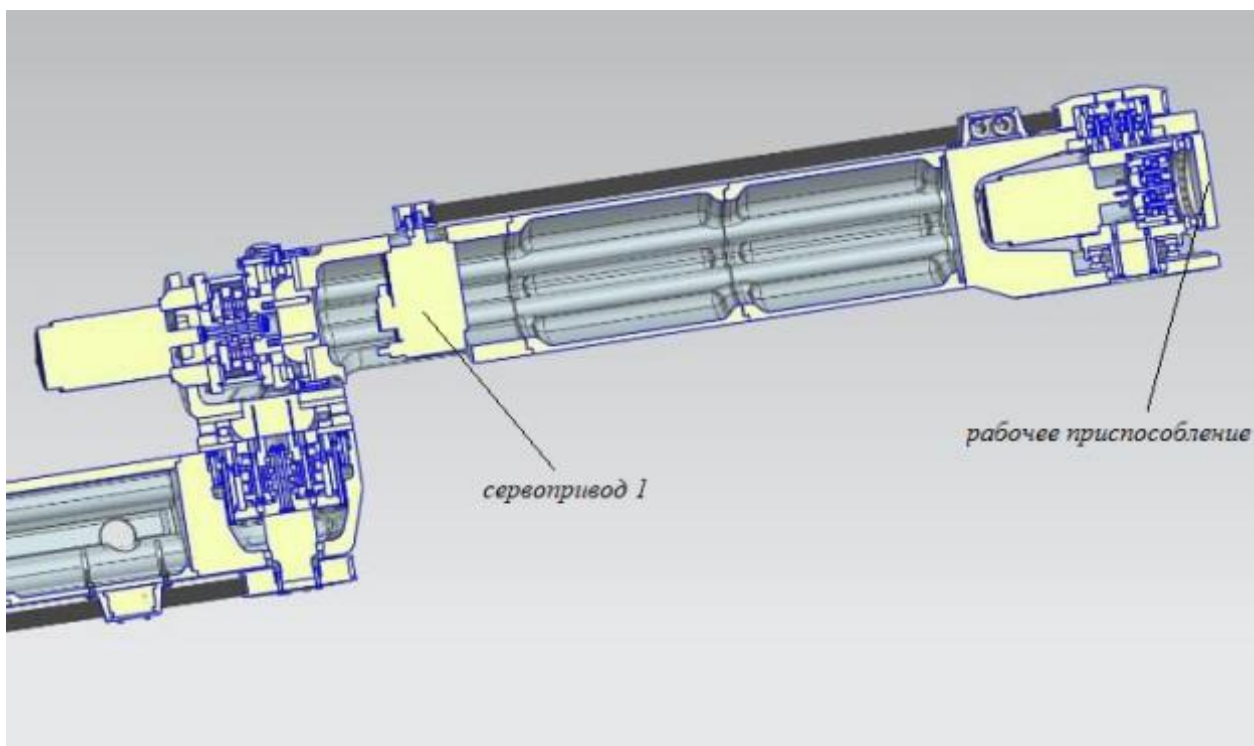


Рисунок 21 - Стрела робота-манипулятора

Спроектированное рабочее приспособление представлено на рисунке 22.

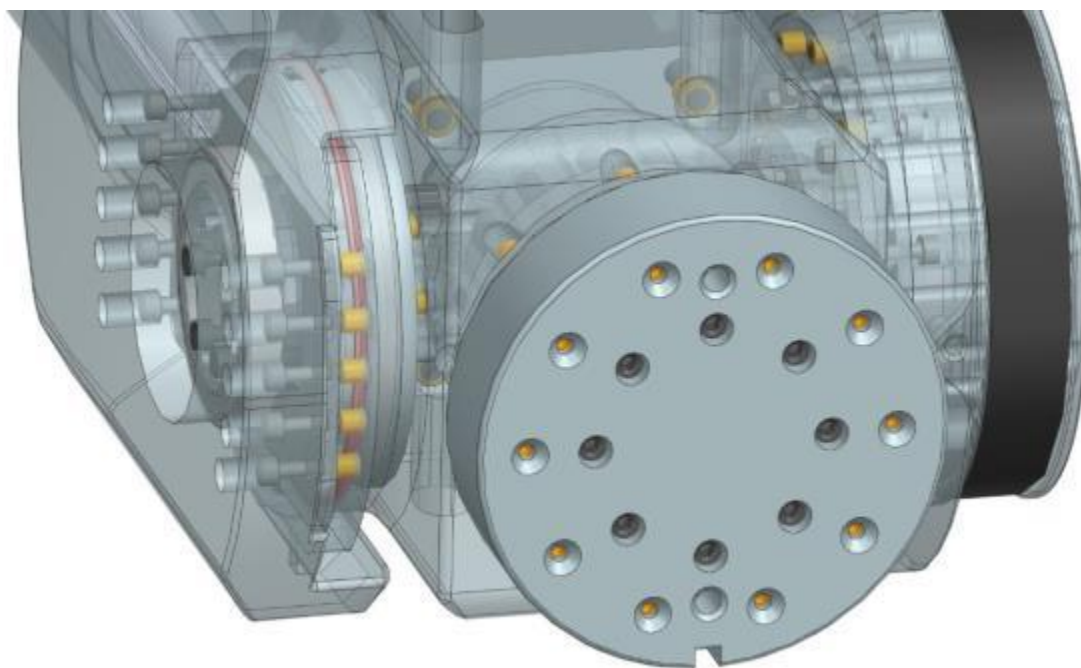


Рисунок 22 – Рабочее приспособление робота-манипулятора

### 3. Разработка электропривода

Разработка электропривода для управления манипулятором — это ключевой этап в создании эффективной и надежной системы, позволяющей выполнять задачи с высокой точностью и скоростью. В этом процессе нужно учитывать множество факторов - требования к производительности, точности, надежности и экономичности. Для начала, необходимо составить структурную схему (рисунок 23), чтобы иметь более подробное представление о компонентах манипулятора. Схема была спроектирована в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D.

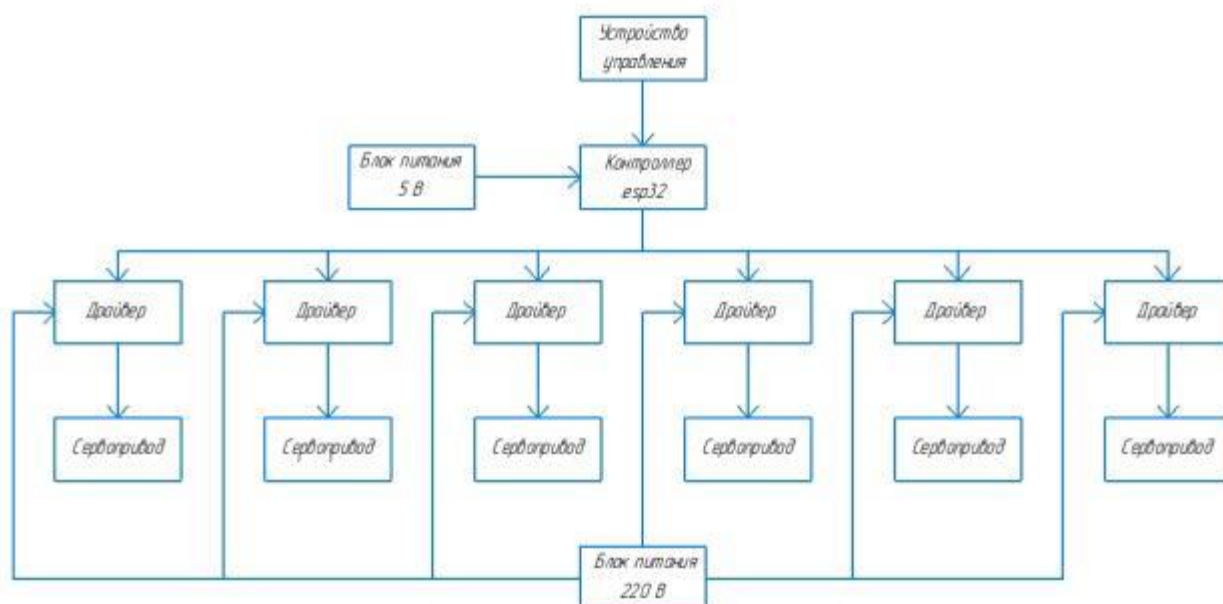


Рисунок 23 – Структурная схема робота-манипулятора

С помощью телефона или компьютера на плату контроллера esp32 будет поступать команда, а контроллер осуществлять непосредственно движение робота-манипулятора с помощью сервоприводов через драйверы. Напряжение питания контроллера осуществляется через блок питания 5 В

посредством USB кабеля. Напряжение питания драйверов сервоприводов осуществляется через сеть 220 В.

Вся электрическая часть робота-манипулятора будет состоять из шести сервоприводов с драйверами и контроллером для управления.

Основные этапы при разработке электропривода:

- определение требований. Перед началом проектирования электропривода необходимо четко определить требования к системе: крутящий момент (определить максимальный крутящий момент, необходимый для выполнения задач манипулятора), скорость (установить требуемую скорость движения манипулятора), точность (определить допустимые отклонения в позиционировании и движении) и условия эксплуатации (учесть внешние факторы, такие как температура, влажность, пыль и вибрации);

- выбор типа электропривода. Существует несколько типов электроприводов, которые можно использовать для управления манипулятором: сервоприводы (обеспечивают высокую точность и контроль за положением), шаговые двигатели (обеспечивают хорошую точность на низких скоростях и могут быть использованы в системах с открытой обратной связью) и DC-двигатели (простые в управлении и недорогие, но требуют дополнительных систем управления для достижения высокой точности).

Важным этапом в разработке управления манипулятором является выбор контроллера, к которому можно подключить одновременно шесть двигателей и управлять процессом с телефона [16].

### **3.1 Выбор приводов**

Для робота-манипулятора было решено выбрать сервоприводы в качестве электропривода. Сервоприводы, в отличие от шаговых двигателей и DC-двигателей, имеют большую грузоподъемность, но они намного дороже.

Были приобретены шесть сервоприводов HHLTNC 80 AST (рисунок 24) на 400, 600 и 1000 Вт (характеристики сервоприводов указаны в таблице А.1) [19].



Рисунок 24 – Сервопривод HHLTNC 80 AST

В комплекте с сервоприводами были приобретены шесть драйверов T3D DRIVER (рисунок 25) [20].



Рисунок 25 – Драйвер сервопривода T3D DRIVER

### 3.2 Выбор платы управления

Для управления роботом-манипулятором была приобретена 6-осевая коммутационная плата (рисунок 26) с MCU esp32 в качестве основного процессора.



Рисунок 26 – 6-осевая коммутационная плата esp32

Данная коммутационная плата с esp32 является оптимальным бюджетным решением для управления роботом-манипулятором, так как у нее имеется 32-битный двухъядерный процессор со скоростью до 240 МГц для более быстрого реагирования и большей стабильности, функция Wi-Fi, благодаря которой можно управлять роботом с помощью мобильного телефона, планшета или компьютера и возможность перепрограммировать устройство. Она имеет несколько схем защиты источника питания, таких как защита от перенапряжения и защита от обратного подключения. Питание платы осуществляется с помощью USB (5 В), а также с помощью внешнего источника питания напряжением 12-24 В и имеет защиту, которая автоматически отключит питание, когда оно превышает 30 В.

6-осевая коммутационная плата с MCU esp32 идеально подошла в качестве управляющего контроллера для робота-манипулятора, так как она имеет шесть выводов для управления всеми шестью сервоприводами, которые имеются в манипуляторе. Так же в данной плате большим плюсом является то, что в ней уже имеется заводская прошивка для управления роботом, что упрощает составление и написание программного кода. Питание осуществляется через USB-порт (5 В).

### **3.3 Проектирование электрической принципиальной схемы**

По имеющимся электрическим элементам была составлена электрическая принципиальная схема (рисунок 27) и спецификация (см. рисунок Б.1). Схема была оформлена в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D.

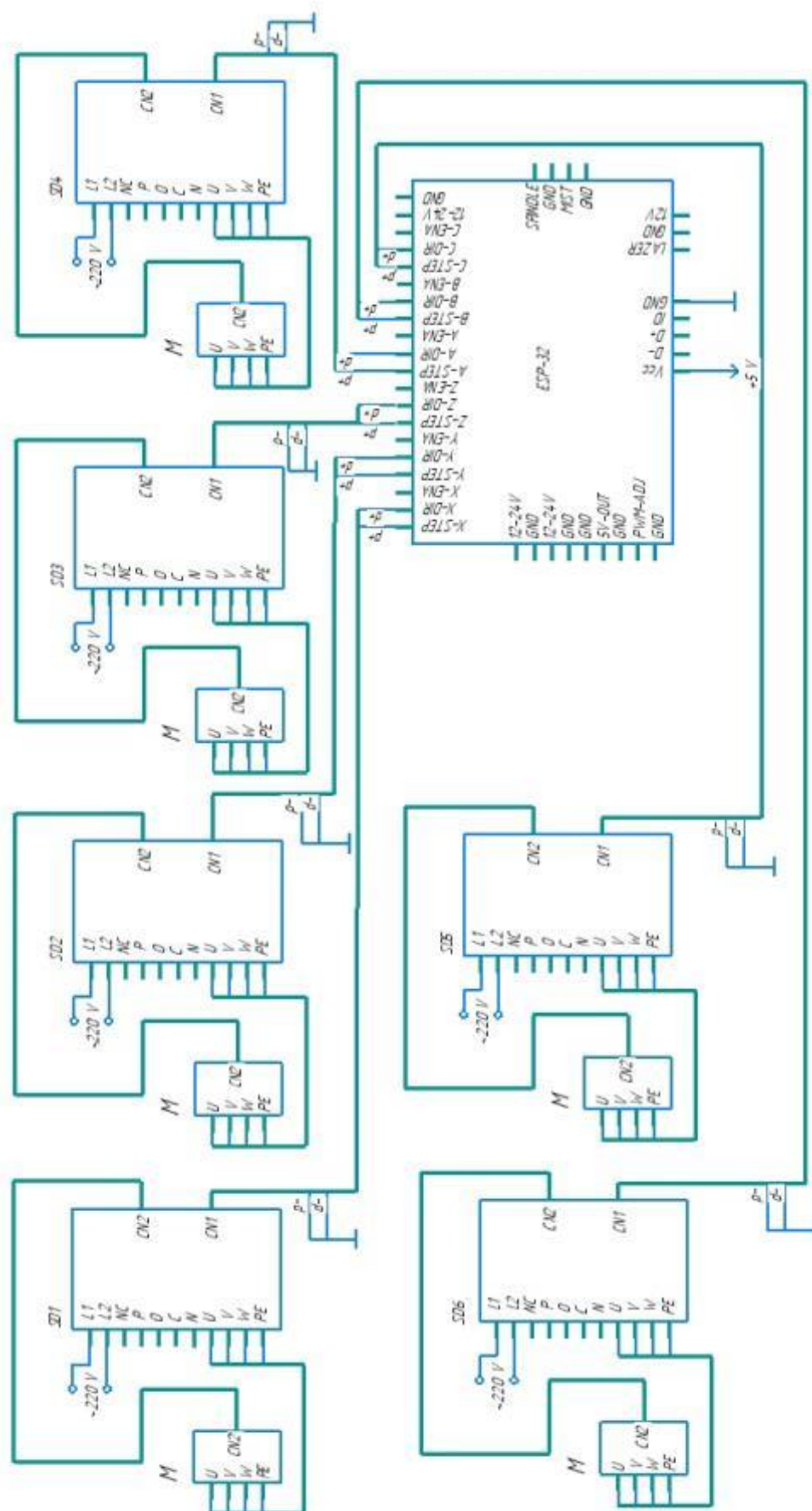


Рисунок 27 – Схема электрическая принципиальная

Электрическая схема состоит из платы контроллера esp32, которая управляет шестью сервоприводами M1-M6 через драйверы SD1-SD6. Питание платы контроллера приходит через кабель USB и составляет 5 В.

Каждый сервопривод имеет 4 выхода U, V, W, PE, которые подключаются к аналогичным выходам драцвера и 1 выход коннектора CN2 для энкодера.

Драйверы сервоприводов питаются от сети 220 В через входы L1 и L2. Коннектор CN1 имеет входы d+, d-, p+ и p-. Провода d- и p- подключаются к нулю, а d+ и p+ непосредственно к плате контроллера esp32. Так драйвер сервопривода SD1 через коннектор CN1 подключается контактами d+ и p+ к выходам контроллера X-STEP и X-DIR, драйвер SD2 подключается контактами d+ и p+ к выходам контроллера Y-STEP и Y-DIR, драйвер SD3 подключается контактами d+ и p+ к выходам контроллера Z-STEP и Z-DIR, драйвер SD4 подключается контактами d+ и p+ к выходам контроллера A-STEP и A-DIR, драйвер SD5 подключается контактами d+ и p+ к выходам контроллера B-STEP и B-DIR, драйвер SD6 подключается контактами d+ и p+ к выходам контроллера C-STEP и C-DIR.



## **4. Сборка робота-манипулятора**

Сборка робота-манипулятора – сложный процесс, требующий внимательности и компетенций, а также понимание принципов работы каждой детали. От качества сборки зависит, насколько правильно, надёжно и эффективно робот-манипулятор будет выполнять поставленные задачи. Также необходимо учитывать и правильную организацию рабочего места для сборки.

Для сборки были предоставлены все необходимые инструменты и материалы, а именно: отвертки, ключи, паяльник (для впаивания резьбовых вставок в корпус, а также пайки ремней), пассатижи, дрель, сверла, наждачная бумага, линейки, штангенциркуль, 3D-принтер и много пластика.

### **4.1 Изготовление корпуса**

Для создания корпуса робота-манипулятора было принято решение распечатать его с помощью 3D-принтера, так как это самый доступный и экономичный метод, а также пластиковый корпус имеет малую массу по сравнению с тем, если бы корпус был выполнен из металла. Материал пластика – PET-G.

PET-G, или полиэтилентерефталат с добавлением гликоля, представляет собой один из наиболее востребованных материалов для 3D-печати. Его популярность объясняется сочетанием высокой прочности, гибкости и устойчивости к воздействию внешних факторов. Этот материал особенно ценится за свои уникальные свойства, которые делают его идеальным для широкого спектра применений [4].

После завершения печати корпуса (рисунок 28), все детали были очищены от поддерживающих структур и обработаны для улучшения внешнего вида, а также высверлены отверстия под крепеж и впаяны резьбовые втулки, чтобы собрать все элементы корпуса воедино. Все

компоненты были предварительно проверены на наличие дефектов и соответствие техническим требованиям.



Рисунок 28 – Пластиковые детали корпуса манипулятора

## **4.2 Изготовление и сборка редукторов**

Редуктора было решено изготовить из пластика PA-6, так как это дешевле, по сравнению с металлом и в случае необходимости возможность быстрой доработки (распечатать новый), если что-то пойдёт не так (например, если шестерни будут иметь люфт, большие зазоры и прокручивания).

Полиамид PA-6, известный также как нейлон 6 или капрон, представляет собой один из наиболее распространенных типов полиамидов. Этот полимер, получаемый полимеризацией капролактама, является важным материалом в современной промышленности благодаря своим уникальным

свойствам и широкому спектру применений. Основными преимуществами РА-6 являются его прочность, устойчивость к износу и универсальность в переработке. Однако, как и большинство полиамидов, РА-6 склонен к водопоглощению, что может влиять на его механические свойства в влажной среде [5].

После того, как все необходимые детали (коронные кольца и циклоидальные диски) были распечатаны и подготовлены подшипники, направляющие и шпильки, были собраны все шесть редукторов (рисунок 29), которые имеет робот-манипулятор.



Рисунок 29 – Процесс сборки редукторов

В дальнейшем, после проведения успешных испытаний, редукторы планируется собрать из стали, вырезанной на лазерной резке.

#### **4.3 Изготовление ременных передач**

Для сборки ременных передач необходимо 2 зубчатых ремня, 3D-принтер, шурупы и пружины для натяжителя. С помощью 3D-печати были

распечатаны ролики, корпуса натяжителей и шкивы. Материал пластика – PET-G.

Были приобретены 2 зубчатых полиуретановых ремня с металлическим кордом (рисунок 30). Профиль зубьев – htd-5m.

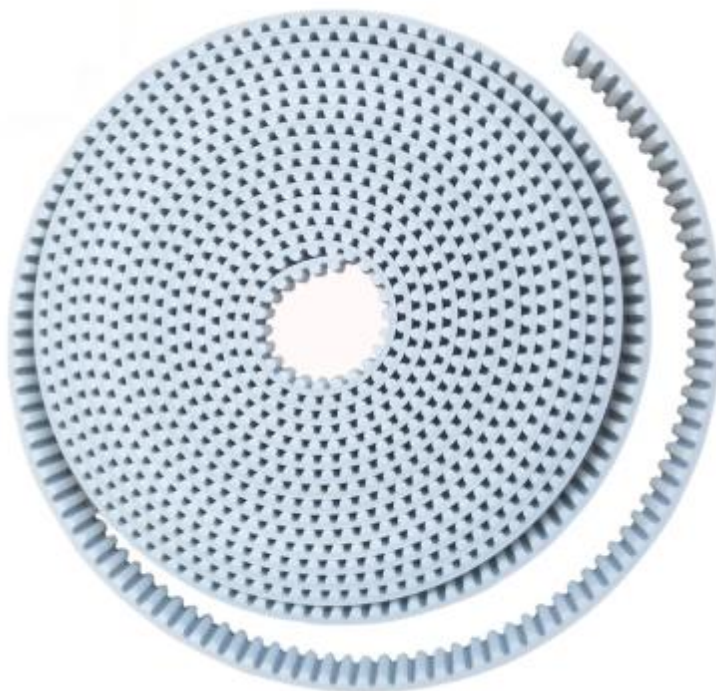


Рисунок 30 – Зубчатый ремень

Ремень был приобретен в рулоне, поэтому его пришлось обрезать на нужную длину и с помощью паяльника с широким жалом запаять.

Шкивы и натяжители ремней были изготовлены из пластика PET-G, напечатанные на 3D-принтере.

#### **4.4 Сборка робота-манипулятора**

Общая сборка началась с корпуса, а именно с его основания. Оно состоит из пластиковой оболочки, внутри которой на винты крепится

сервопривод на соответствующее место. Далее, спомощью стального уголка – кронштейна (рисунок 31) прикручиваем к основанию с помощью болтов редуктор и сервопривод.



Рисунок 31 – Стальной уголок для основания

После основания начинается сборка плеча манипулятора. Оно собирается из каркаса (стальные стержни и строительные шпильки) и пластикового корпуса. Внутри всей конструкции на соответствующие места были прикручены на винты и болты два редуктора и ременная передача (рисунок 32).



Рисунок 32 – Ременная передача в сборе на плече робота-манипулятора

Затем начинается сборка стрелы робота-манипулятора. Ее скелет был собран из стальных строительных шпилек и стержней для прочности конструкции и заключен в пластиковый корпус. Также, на соответствующие места были установлены три сервопривода, три редуктора, ременная передача и рабочее приспособление.



Сервоприводы, установленные совместно с редукторами, крепятся через вал посредством шпонок, обеспечивая надёжное соединение и минимальные потери энергии. На рисунке 33 представлены собранные основание 1, стрела 2 и плечо 3 робота-манипулятора.



Рисунок 33 – Собранные основание, плечо и стрела

Последним этапом сборки является соединение основания, плеча и стрелы вместе.

Итоговая сборка робота-манипулятора представлена на рисунке 34.



Рисунок 34 – Готовый корпус робота-манипулятора

После сборки промышленного робота-манипулятора было решено дать ему название – АТ-001.



## **5. Управление роботом-манипулятором**

Собранным роботом-манипулятором планируется управлять с телефона или компьютера, но для этого необходимо иметь программный код.

Так как в контроллере esp32 уже имеется заводская прошивка FluidNC, что намного упрощает время написания программного кода. По электрической схеме к контроллеру esp32 были подключены все сервоприводы и драйверы, чтобы все узлы правильно работали и функционировали.

Управление промышленным роботом-манипулятором осуществляется следующими образом:

- а) плата контроллера подключается к питанию (5 В) посредством кабеля USB-b;
- б) на телефоне или компьютере необходимо подключиться к сети Wi-Fi и ввести пароль (1234);
- в) при подключении к сети Wi-Fi автоматически появится окно управления роботом-манипулятором (рисунок 35).



Рисунок 35 – Интерфейс управления роботом-манипулятором

С помощью стрелок  $\pm X$  осуществляется поворот влево и вправо робота-манипулятора, а стрелки  $\pm Y$  осуществляется наклон вниз и вверх. Каждая стрелка имеет 4 скорости. Чем ближе нажимать к середине, тем медленнее будет скорость работы манипулятора. Скорость можно отрегулировать здесь же [15].

В дальнейшем планируется перепрошивать контроллер под необходимые операции (сварка, подъем и перемещение груза, окраска и т.д.) в зависимости от желания потребителя, так как имеющаяся прошивка больше является универсальной и тестовой.

## 6. Испытания промышленного робота-манипулятора

После успешного завершения сборки робота-манипулятора произведены первые его тесты на поднятие грузов. На его рабочее приспособление был прикреплен крюк, к которому был подвешен груз массой 5 кг. Корпус манипулятора показала себя не удовлетворительно, так как он начал шевелиться и трещать, а редукторы издавали шум из-за имеющихся люфтов. Было решено усилить корпус – были напечатаны на 3D-принтере более толстые стенки корпуса для плеча и стрелы и усилен их скелет. На рисунке 36 изображен манипулятор с доработанным корпусом (синим цветом).



Рисунок 36 – Доработка корпуса робота-манипулятора

После доработок, были произведены тесты на поднятие груза массой 10 кг. По этим результатам редукторы, находящиеся в основаниях плеча и стрелы манипулятора не выдержали нагрузки и стали прокручиваться, не давая роботу совершить подъем. После исправления началась другая

проблема – тряска. Причина этого изображена на рисунке 37 – нет должного контакта у опорного подшипника в соединениях осей. Оси не могли провернуться под своим весом.

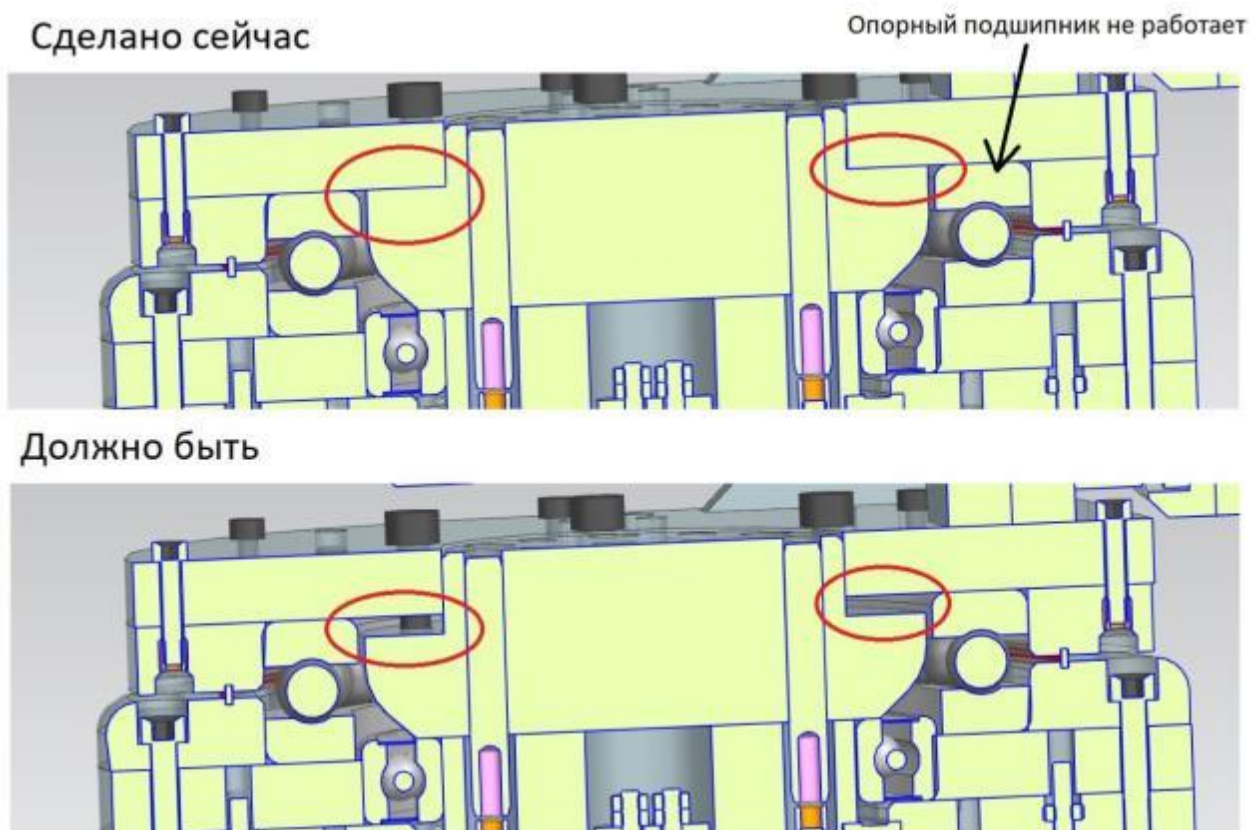


Рисунок 37 – Поиск и устранение неисправностей редукторов

После доработок с редукторами удалось уменьшить люфт и избавиться от тряски, но все же под большими нагрузками (19 кг и более) он усиливается, но немало важен тот факт, что все элементы корпуса манипулятора и редукторов выполнены из пластика, что сильно влияет на грузоподъемность, а именно снижает ее.

По проведенным испытаниям была составлена таблица 2, где указаны основные характеристики промышленного робота-манипулятора и отражена конечная цена на затраченные материалы и компоненты без учета работы над сборкой, но с учетом доработанных узлов.

Таблица 2 – Технические характеристики проектируемого промышленного робота-манипулятора

| Модель | Рабочий диапазон,<br>мм | Количество осей | Грузоподъемность,<br>кг | Цена,<br>руб. |
|--------|-------------------------|-----------------|-------------------------|---------------|
| АТ-001 | 1725                    | 6               | 28,5                    | 160.000       |

По таблице 2 видно, что в сравнении с имеющимися в продаже на Российском рынке промышленные роботы-манипуляторы, которые были проанализированы в таблице 1, разработанный робот полностью удовлетворяет поставленным целям – имеет в разы меньшую стоимость, а также собран из доступных и не дорогих комплектующих.

В дальнейшем планируется совершенствовать манипулятор для улучшения его характеристик.

## Заключение

В процессе выполнения данной выпускной квалификационной работы был спроектирован, изготовлен и собран промышленный робот-манипулятор, который полностью функционирует и управляется с помощью ПК и телефона через Wi-Fi. Манипулятор является шести-осевым, имеет 6 сервоприводов с драйверами и контроллер esp32. Поворот осей робота реализуют сервоприводы, циклоидальные редукторы и ременные передачи, которые работают и полностью функционируют.

Выбранная плата управления esp32 является программируемой, что даёт возможность написать программный код для любых поставленных задач (сварка, подъем и перемещение груза, покраска) и делает манипулятор универсальным.

В работе были представлены все этапы проектирование всех компонентов и узлов, а также полная сборка всего манипулятора. Был разработан электропривод для управления роботом-манипулятором, который включает в себя 6 сервоприводов с драйверами и контроллер esp32.

Проанализировав рынки доступных вариантов промышленных роботов-манипуляторов, были сформулированы цели, которые успешно выполнены, а именно:

- робот-манипулятор имеет малую стоимость, в отличие от аналогов, что дает возможность выпускать его массово для малых и больших предприятий;
- в сборке робота-манипулятора использовались недорогие и легкодоступные детали и компоненты;
- разработан электропривод управления промышленного робота-манипулятора.

Были спроектированы механическая структура манипулятора, корпус, редукторы, ременные передачи, выбраны электроприводы для робота-манипулятора, собрана вся электрическая часть (сервоприводы, контроллеры

для управления сервоприводов и esp-32). Это доказывает то, что все поставленные задачи успешно достигнуты.

По началу, робот-манипулятор проходил первые испытания плачевно, но путем устранения неисправностей и доработок он работает и имеет максимальную грузоподъемность в 28,5 кг и рабочий диапазон – 1725 мм. В дальнейшем планируется модернизировать манипулятор – сделать стальные редукторы и усилить корпус железом, так как пластиковые детали ограничивают грузоподъемность.

## Список используемой литературы

1. Конструкция циклоидальных редукторов : сайт. – URL: [https://www.drivemeh.ru/blog/princzip-raboty-planetarno-czevochnogo-reduktora/?utm\\_source=yandex&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=44545661&utm\\_content=16842564589&utm\\_term=циклоидальный%20редуктор&yclid=10827380599249436671](https://www.drivemeh.ru/blog/princzip-raboty-planetarno-czevochnogo-reduktora/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=44545661&utm_content=16842564589&utm_term=циклоидальный%20редуктор&yclid=10827380599249436671) (дата обращения: 14.04.2025)
2. Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудианов Н.А., Гурджи А.И., Рябов А.В., Хрущев В.С. Перспективы разработки автономных наземных робототехнических комплексов специального военного назначения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2016. – №10. – С. 1-13.
3. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота манипулятора / Пол Р. – пер. с англ. М.: Наука, 1976. – 104 с.
4. Пластик PETG : сайт. – URL: <https://meritogroup.ru/2024/12/20/plastik-petg/> (дата обращения: 20.05.2025)
5. Полиамид РА-6 : сайт. – URL: <https://rusplast.by/articles/23672/> (дата обращения: 09.04.2025)
6. Ременной модуль : сайт. – URL: <https://unitmc.ru/news/moduli-lineynogo-peremeshheniya-s-remen/> (дата обращения: 18.03.2025)
7. Смирнова М.А., Смирнов М.Н., Смирнов Н.В. Система многоцелевого управления роботом-манипулятором// Прикладная математика: статья: электр. версия. 2022. С. 621-630. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-mnogotsелеvogo-upravleniya-robotom-manipulyatorom/viewer/> (дата обращения: 29.12.2024)
8. Робот-манипулятор – что это такое и в каких сферах используется : сайт. – URL: <https://kosmek.ru/blog/robot-manipulyator-cto-eto-takoe-i-v-kakih-sferah-ispolzuesya.html> (дата обращения: 14.04.2025)



9. Робот-манипулятор CRP RA18-25 : сайт. – URL: <https://crp-robot.ru/promyshlennye-roboty/roboty-manipulyatory/ra18-25> (дата обращения: 17.01.2025)
10. Робот-манипулятор FANUC M-10iD/12 : сайт. – URL: <https://robotec.ru/products/promyslennye-roboty/50-promyslennyj-robot-fanuc-m10id12.html> (дата обращения: 17.01.2025)
11. Робот-манипулятор GSK RB06Q1-1430 : сайт. – URL: [https://www.intertechpribor.ru/catalog/robotizatsiya\\_svarki/svarochnye\\_roboty/6366/](https://www.intertechpribor.ru/catalog/robotizatsiya_svarki/svarochnye_roboty/6366/) (дата обращения: 17.01.2025)
12. Робот-манипулятор KUKA KR8 R1429 arc HW : сайт. – URL: <https://k2tool.ru/catalog/10625-prom-robot-kuka-kr-8-r1420-arc-hw#description> (дата обращения: 17.01.2025)
13. Циклоидальные редукторы : сайт. – URL: <https://belrobot.by/produktsiya/privodnaya-tehnika/reduktory-i-motor-reduktory-obshchepromyshlennyye/reduktory/> (дата обращения: 07.12.2024)
14. Эпитохорда : сайт. – URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Эпитрохоида> (дата обращения: 09.04.2025)
15. FluidNC : сайт. – URL: <http://wiki.fluidnc.com/en/installation> (дата обращения: 19.04.2025)
16. Mohd Ashiq Kamaril Yusoffa, Reza Ezuan Saminb, Babul Salam Kader Ibrahimc. Wireless Mobile Robotic Arm // Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Batu Pahat, Johor, Malaysia, 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/271890997>
17. Paula Useche Murillo, Robinson Jimenez Moreno, Oscar F Avilés S. Individual Robotic Arm Manipulator Control Employing Electromyographic Signals Acquired by Myo Armbands // International Journal of Applied Engineering Research Volume 11, Number 23, 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/314079352>
18. Pieter Dijkshoorn. Designing a generic software architecture for ARW manipulators // University of Twente, Enschede, Netherlands, November 2016.

URL: <https://www.ram.ewi.utwente.nl/calendar/details/designing-a-generic-software-architecture-for-arw-manipulators.html>

19. Servo drive HLTNC 80 : сайт. – URL: <https://aliexpress.ru/item/1005004837245384.html?ysclid=mc1mwure1h808754459> (дата обращения: 17.11.2024)

20. T3D Servo Series : сайт. – URL: [https://cnc-tehnologi.ru/files/T3D\\_Servo\\_Series.pdf](https://cnc-tehnologi.ru/files/T3D_Servo_Series.pdf) (дата обращения: 09.12.2024)

# Приложение А **Технические характеристики сервоприводов**

Таблица А.1 – Характеристики сервоприводов NHLTNC 80 AST

| Наименования<br>характеристик                        | Мощность сервопривода, Вт |           |           |           |
|------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                                      | 400                       | 600       | 750       | 1000      |
| Напряжение питания, В                                | 220                       | 220       | 220       | 220       |
| Номинальный/ максимальный<br>крутящий момент, Нм     | 1,27/3,82                 | 1,91/5,73 | 2,4/7,2   | 3,8/11,4  |
| Номинальная/ максимальная<br>частота вращения об/мин | 3000/6000                 | 3000/6000 | 3000/5000 | 2500/3000 |
| Номинальный/ максимальный<br>ток, А                  | 2,8/8,4                   | 4/12      | 4,8/14,4  | 4,8/14,4  |
| Сопротивление, Ом                                    | 3±10%                     | 3,2±10%   | 1,6±10%   | 3±10%     |
| Максимальная радиальная<br>нагрузка, Н               | 245                       | 245       | 392       | 392       |
| Максимальная осевая нагрузка,<br>Н                   | 74                        | 74        | 147       | 147       |
| Масса, кг                                            | 1,22                      | 1,4       | 2,2       | 2,71      |

# Спецификация

Формат A4

60