

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»

Институт нанотехнологий в электронике, спинtronике и фотонике (ИНТЭЛ)

Кафедра физики конденсированных сред (№67)

**Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе на  
тему:**

«Биотехнический робот:  
Универсальный Манипулятор Небольших Объектов»

Выпускная квалификационная работа выполнена в НИЯУ МИФИ

|   |                 |
|---|-----------------|
| Студент группы Б18-403 Нормурадов С.Н.  | _____           |
| Научный руководитель:<br>к.т.н., доцент отделения нанотехнологий в<br>электронике, спинtronике и фотонике ООП НИЯУ<br>МИФИ, Некрасов П.В. | (подпись) _____ |
| Зам. зав. кафедрой физики конденсированных сред<br>(№67)<br>д.ф.-м.н., профессор Никитенко В.Р.   | (подпись) _____ |
|   | (подпись) _____ |

Москва, 2022

# **СОДЕРЖАНИЕ**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>СОДЕРЖАНИЕ.....</b>                              | <b>2</b>  |
| <b>АННОТАЦИЯ.....</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>                                | <b>4</b>  |
| <b>ГЛАВА 1. ОБЗОРНАЯ ЧАСТЬ.....</b>                 | <b>5</b>  |
| 1.1. Манипуляционные роботы и их классификация..... | 5         |
| 1.2. Обзор представленных на рынке решений.....     | 13        |
| 1.3. Анализ представленных на рынке решений.....    | 19        |
| 1.4. Требования к разрабатываемому роботу.....      | 20        |
| <b>ГЛАВА 2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ РОБОТА.....</b>   | <b>21</b> |
| 2.1. Манипулятор.....                               | 23        |
| 2.1.1. Рабочий орган (схват).....                   | 23        |
| 2.1.2. Исполнительный механизм.....                 | 32        |
| 2.1.3. База.....                                    | 38        |
| 2.1.3. Пульт управления.....                        | 39        |
| <b>ГЛАВА 3. АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ РОБОТА.....</b>        | <b>40</b> |
| 3.1. Выбор электронных компонентов.....             | 40        |
| 3.2. Пульт управления.....                          | 44        |
| 3.3. Манипулятор.....                               | 50        |
| <b>ГЛАВА 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РОБОТА.....</b> | <b>67</b> |
| 4.1. Пульт управления.....                          | 67        |
| 4.2. Манипулятор.....                               | 74        |
| 4.3. Апробация и итоги проделанных работ.....       | 75        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>                              | <b>76</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>        | <b>77</b> |

## **АННОТАЦИЯ**

Данная работа посвящена разработке биотехнического робота «Универсальный Манипулятор Небольших Объектов», в частности его составляющих: пульта дистанционного управления и манипулятора.

Глава 1 содержит описание манипуляционных роботов, краткий обзор и анализ готовых решений, представленных на рынке, а также определение требований к разрабатываемому роботу.

Глава 2 посвящена рассмотрению конструкторских разработок составных частей робота: рабочего органа, исполнительного механизма манипулятора и устройства управления

Глава 3 состоит из описания аппаратной части: выбора электронных компонентов, процесса 3D-проектирования печатных плат и их изготовления по технологиям ЛУТ и фотолитография с использованием фотополимерного 3D-принтера.

Глава 4 включает в себя программное обеспечение, разработанное с целью обработки пользовательских команд и обеспечения соответствующего функционирования робота, а также апробацию готового робота.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Достижения в робототехнике, искусственном интеллекте и машинном обучении открывают новую эру автоматизации, поскольку машины соответствуют или превосходят человеческие возможности в ряде трудовых деятельности. Здесь стоит отметить что автоматизация трудовых процессов может повысить рост производительности в мире на 0.8 – 1.4 процента годовых [1] за счет уменьшения количества ошибок или повышения качества и скорости. При этом прогнозируемые физические действия, сбор и обработка данных имеют наиболее значительный технический потенциал автоматизации, что делает сектора экономики такие как гостиничное хозяйство и общественное питание, промышленность и сельское хозяйство наиболее привлекательными в плане автоматизации [1]. Ярким примеру этому может послужить наблюдаемый во всем мире восходящий тренд внедрения промышленных роботов от 116 тысяч единиц в 2011 по 487 тысяч в 2021 [2].

Начиная с 2014 года Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК) проводит робототехническое соревнование «Кубок РТК» для молодых инженеров, студентов и школьников, в котором участникам предстоит испытать на работоспособность в полигоне, имитирующем экстремальные условия (пересеченная местность, урбанизированная среда и последствия катастроф), робототехнический комплекс из мобильной платформы и манипулятора.

Данные два факта привели к необходимости в универсальном манипуляторе захвата для управления пространственного положения небольших объектов твердой фазы и различной конфигурации (геометрия и степень свободы), дистанционно управляемым и функционирующим самостоятельно и/или в составе мобильной робототехнической платформы, разработке которого и посвящен.

# ГЛАВА 1. ОБЗОРНАЯ ЧАСТЬ

## 1.1. Манипуляционные работы и их классификация

Существует несколько определений манипуляционных, или промышленных, роботов, но во многом они схожи: автоматическое устройство, состоящее из механической части (один или несколько манипуляторов) и системы управления которая участвует в формировании управляющих воздействий на исполнительные механизмы манипулятора, предназначенных для перемещения предметов производства[3]; автоматическая машина, передвижная или стационарная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций [4].

Далее рассмотрим каждую составляющую по отдельности:

**Манипулятор** – это управляемый механизм, обладающий двигательный функционал, аналогичный функционалу руки человека при пространственном перемещении объектов, и оснащенный рабочим органом [5].

**Исполнительный механизм** манипулятора - это открытая кинематическая цепь, в которой звенья соединяются последовательно между собой сочленениями различного типа, очень часто встречаются кинематические пары V-го класса (одна степень подвижности) и среди данного класса поступательные и вращательные сочленения [6].

Число степеней подвижности и диапазон действий манипулятора определяется из сочетания и взаимного расположения звеньев и сочленений. Обычно первые три сочленения в исполнительном механизме манипулятора обеспечивают *переносные* степени подвижности (т.е. транспортируют рабочий орган в требуемое место), а *ориентирующие* степени подвижности

(необходимая ориентация рабочего органа) реализуются остальными кинематическими парами. [7]. Разновидности первых трех сочленений подразделяют большинство роботов на четыре категории в зависимости от системы координат движения [8]:

- декартовая система координат — три поступательных начальных сочленений;
- цилиндрическая система координат — два поступательных и одно вращательное начальные сочленения;
- сферическая система координат — одно поступательное и два вращательных начальных сочленений;
- угловая система координат — три вращательных начальных сочленений.

**Рабочий орган** – устройство, расположенное на конце манипулятора для выполнения специальных заданий. Технологический инструмент или захватное устройство может выступать в качестве примера. В качестве наиболее универсальной разновидности захватного устройства можно привести *схват* — устройство, захватывающее и удерживающее объект за счет перемещения одних частей данного устройства относительно других [9]. Обычно, схват по своей конструкторской реализации схож с кистью человеческой руки: захватывание объекта обеспечивается посредством механических «пальцев». Плоские предметы захватываются с помощью устройств в виде пневматических присосок. Также применяются крюки (для транспортировки объектов с конвейерных линий), совки или черпаки (для гранулированных, сыпучих или жидких субстанций).

По типу механических действий для удержания объекта захватные устройства классифицируются на [6]:

- схватывание (схваты механические и устройства с гибкими рабочими камерами, нагнетаемые жидкостью или сжатым воздухом в ходе процесса);

- поддерживание (применяются с целью удержания нижней поверхности объекта, выступающих его частей или имеющихся в них отверстий, нежели зажатия);
- удерживание (оказание силового воздействия на объект с использованием различного рода физических явлений: вакуум, магнитное и электростатическое поля, адгезия).

Использование схвата с целью удержать рабочий инструмент в промышленных работах встречается редко. Обычно инструмент для воспроизведения требуемой технологической операции устанавливается на запястье робота и тем самым становится его рабочим органом. В качестве примера можно привести: сварочные клещи, используемые в точечной сварке, пульверизатор для распыления красок, сварочные головки для сварки дуговой, гайковёрт, отвёртка, фреза, дрель, ножи дисковые и т. п. [5].

**Приводы.** В большинстве случаев чтобы привести в движение звенья и рабочий орган манипулятора используются три типа приводов: гидравлические, электрические или пневматические. Если требуется развить значительные величины развиваемого усилия или высокого давления, как в крупных работах с большой грузоподъёмностью, стоит отдать предпочтение гидравлическим приводам. В тех случаях, когда не важно достижение столь больших сил или быстродействий, но необходимо достижение высокой точности используются электрические приводы. Наконец, если размеры робота небольшие и выполняемые им операции быстрые циклические и простые, то пневматические приводы то что нужно. Согласно статистике, приблизительно 50 % современных промышленных роботов работают на электрическом приводе, 30 % — гидравлическом и 20 % — пневматическом [6].

### **Система управления.**

Развитие систем управления промышленных роботов можно разделить на две ветви. Первая отталкивается от систем программного управления

используемых в производственных станках, и сформировалась в автоматически управляемых промышленных манипуляторов. Во втором направлении можно проследить создание таких систем как полуавтоматические биотехнические и интерактивные, управляемых человеком-оператором [10].

Таким образом, можно выделить три вида промышленных роботов (в каждом из которых можно выделить несколько разновидностей) [11]:

### **Автоматические роботы:**

*Программные роботы* (управляемые программой) — простейшая и по сей день широко используемая за счет низкой стоимости модель промышленного робота с автоматическим управлением на тех промышленных предприятиях где требуется обслуживание простых технологических операций. Такие роботы, как правило, не обеспечены сенсорами и весь функционал состоит из жестко заданных программ в виде цикла действий, записанных в устройство памяти;

*Адаптивные роботы* (подстраиваемые под изменения внешних воздействий) — роботы с присутствием сенсоров (системы очувствления) и обеспеченные пакетом программ. В зависимости от анализа сигналов, отправляемых датчиками в систему управления, формируется переход между программами (смена производственной операции). Несмотря на малые различия в программном и аппаратном обеспечении от предыдущей разновидности, требования к возможностям данных роботов повышенные;

*Обучаемые роботы* — роботы, в которых совокупность действий целиком создаются посредством обучения (алгоритм действий робота формируется человеком-оператором, который использует специальную плату или устройство пульта управления, и в последствии этот алгоритм загружается в устройство памяти);

*Интеллектуальные роботы* (с наличием элементов искусственного интеллекта) — роботы, обладающие способностью самостоятельно анализировать данные с сенсорных устройств для восприятия и распознавания окружающей обстановки, построения модели среды, и автоматического принятия решения по поводу последующих действий, а также самообучаться за счет накопленного опыта самостоятельной деятельности;

### **Биотехнические роботы:**

*Командные роботы* (управляемые пользовательскими командами) — манипуляторы, каждое сочленение которых приводится в движение посредством командного устройства дистанционного управления в руках человека-оператора (по строгим определениям, это — не совсем роботы, а «полуроботы»);

*Копирующие роботы* (имитирующие действия человека-оператора) — манипуляторы, действия которых копируются с динамического задающего устройства, подобного по кинематическим соображениям исполнительному механизму манипулятора и приводимого в двигательный процесс человеком-оператором, (аналогично предыдущему случаю, «полуроботы» более подходят к таким манипуляторам);

*Полуавтоматические роботы* — роботы, управляемые человеком-оператором лишь для задания пространственного положения и ориентации рабочего органа манипулятора, а согласование движений в сочленениях осуществляется самостоятельно системой управления роботов;

### **Интерактивные роботы:**

*Автоматизированные роботы* (в системе управления присутствуют элементы автоматизации) — роботы, в которых чередуются такие режимы управления как биотехнические и автоматические;

*Супервизорные роботы* (частично управляемые супервизором) — роботы, которые во всех этапах требуемого цикла операций функционируют автоматически, но осуществляют переход между этапами по заданию команды человека-оператора;

*Диалоговые роботы* (управляемые через диалоговое окно) — автоматические роботы (разновидность любой), которые способны вступать во взаимодействие с человеком-оператором, с использованием языка разных уровней (подача голосовых или текстовых команд, ответных сообщений робота).

В большинстве современных роботов присутствуют элементы обратной связи (образующие в совокупности *информационно-сенсорную систему*) и иерархической системы управления роботом [7].

### **Информационно-сенсорная система.**

В современных информационно-сенсорных системах, используемых в робототехнике, существует функциональная связь между измерительными и вычислительными средствами, назначение которых заключается в получении информации от различного рода датчиков и её последующая обработка с целью дальнейшего использования системой управления [7].

Разнообразие используемых в современных роботах датчиков велико и существует следующие основные группы, на которые они могут быть подразделены [7][8]:

*Внутренние* (кинетические) датчики, обеспечивающие получение информации об значениях усилий в сочленениях манипулятора и его координатные данные:

- датчики перемещений угловых и линейных (сельсины, потенциометры, фотоэлектрические преобразователи, индуктосины и др.);

- датчики скоростей угловых и линейных (фотоэлектрические и струйные датчики, импульсные генераторы, тахогенераторы и др.);
- измерители моментов и сил в сочленениях (пьезоэлектрические датчики, тензодатчики и др.);

*Внешние* датчики, дающие информацию об окружающей среде:

- *тактильные* датчики, способные определить тип контактирующей поверхности объектов окружающей среды;
- *акустические* датчики, обеспечивающие воспринимать внешние звуковые сигналы или сканировать поверхность материалов на наличие трещин или изъянов.
- *визуальные* датчики, позволяющие получать информацию о внешних и физических характеристиках объектов окружающей среды таких как геометрия и освещенность (обычно цифровые телевизионные камеры составляют базу таких датчиков);
- *локационные* датчики, применяемые для определения и измерения физических характеристик среды посредством излучения и поглощения отражённых от объектов сигналов (обычно, электромагнитные волны такие как свет или звуковые);
- *химические* датчики;
- *температурные* датчики.

Построение системы управления роботом по принципу иерархии подразумевает горизонтальное разбиение системы управления на уровни [7]:

- верхний уровень: управляет общее поведение робота;
- уровень планирования движений: рассчитывается необходимая траектория движения рабочего органа;
- уровень координации приводов: происходит организация согласованной работы приводов для обеспечения требуемого перемещения рабочего органа;

- уровень привода: управляет непосредственно двигатель отвечающая за конкретную степень подвижности робота;

### **Достоинства использования.**

Применение роботов, в частности в промышленном производстве, дают ряд преимуществ такие как:

- рост производительности труда (становится возможным проведение технологических процессов в течение трех-четырех смен и 365 дней в году);
- сокращение издержек производства и становление более конкурентоспособным;
- сокращение площади производственных помещений за счет рационального использования оборудования;
- выпуск более качественной продукции в силу повышения точности выполняемых технологических операций;
- исключение воздействия человеческого фактора на качество продукта производимых на конвейерных линиях, требующих выполнения монотонных работ или действий с высокой точностью;
- исключение вредного влияния рабочей среды на персонал, что характерно для производств повышенной опасности;
- сокращение сроков окупаемости вложенных инвестиций.

## **1.2. Обзор представленных на рынке решений**

К настоящему моменту времени разработаны большое разнообразие манипуляционных роботов, но в целом их можно разделить на несколько классов такие как: промышленные, колаборативные (облегченный вариант промышленных и предназначенный для работы бок о бок с человеком), образовательные, бионические, медицинские и т.п. Поэтому перед тем как начать проектировать собственного робота необходимо обратить внимание на уже имеющиеся разработки, выделить в них ключевые достоинства, которые по возможности стоило повторить, а самое главное – недостатки, которые можно было бы исключить. В дальнейшем для обзора и анализа остановимся на рассмотрении колаборативных и образовательных, т.к. только эти роботы обладают близкими для нашей цели характеристиками. Что касается остальных, есть некие существенные недостатки:

- промышленные роботы имеют большие габариты, массу, электрические потребления и высокие стоимости;
- бионические роботы обычно имитируют части человеческого тела как рука или кисть, и прикрепляются к вертикальной плоскости или к телу человека;
- медицинские роботы предназначены для специфических задач (протезирование, хирургические операции и т.п.), высокую степень чистоты и совместимости с человеческим организмом поверхности, соответственно высокую стоимость.

## Коллаборативные



Рис. 1.1. KUKA LBR iiy 3 R760.

1) **KUKA LBR iiy 3 R760** – первая в мире робототехники коллаборативный робот (кобот) представленный в 2004 году немецкой компанией KUKA с более 100-летней историей в области автоматизации производства и промышленной робототехники.

| Достоинства:  | Недостатки:                   |
|---|-------------------------------|
| Специализация: универсальный (загрузка/разгрузка, сборка, упаковка, тестирование, транспортировка), коллаборативный | Стоимость, руб.: от 1 673 001 |
| Рабочий диапазон (макс), мм: 760  | Масса, кг: 22.8               |
| Степени свободы: 6  |                               |
| Полезная нагрузка, кг: 3  |                               |
| Доступ к ПО: открытый (Java), режим обучения, графический язык  | Питание: нет данных           |
| Точность позиционирования, мм: 0.1  | Мощность: нет данных          |
| Рабочий орган: по выбору  |                               |

**Особенности [12]:**



Рис. 1.2. ABB IRB14050

Single-arm YuMi.

2) **ABB IRB14050 Single-arm YuMi** – кобот представленный компанией ABB (ASEA Brown Boveri), которая является объединением шведской компании ASEA и швейцарской Brown Boveri, как дополнение к ранее

представленной в 2015 году паре манипуляционных роботов IRB14000 YuMi.

### Особенности [13]:

| Достоинства:   | Недостатки:                |
|--|----------------------------|
| Специализация: универсальный (упаковка, сборка), коллаборативный | Стоимость, руб.: 2 124 712 |
| Рабочий диапазон (макс), мм: 530 x 560                           | Масса, кг: 9.5             |
| Степени свободы: 7   |                            |
| Полезная нагрузка, кг: 0.5                                       |                            |
| Доступ к ПО: графический язык, режим обучения                    | Питание: нет данных        |
| Точность позиционирования, мм: 0.02                              | Мощность: <0.17кВт         |
| Рабочий орган: схват   |                            |

| Достоинства:   | Недостатки:                 |
|--|-----------------------------|
| Специализация: универсальный, коллаборативный (обнаружение столкновений) | Стоимость, руб.: 2 499 687  |
| Рабочий диапазон (макс), мм: 550 x 970                                   | Масса, кг: 20               |
| Степени свободы: 6   |                             |
| Полезная нагрузка, кг: 4   |                             |
| Доступ к ПО: фирменный софт ROBOGUIDE, режим обучения                    | Питание: 200-300В (50/60Гц) |
| Точность позиционирования, мм: 0.01                                      | Мощность(макс): 0.5кВт      |
| Рабочий орган: по выбору   |                             |



Рис. 1.3. FANUC LR

3) **FANUC LR Mate 200iD/4S** – интеллектуальный мини робот от японской компании FANUC, самый легкий в линейке продукции для автоматизации производства и предназначенный для ограниченных рабочих

пространств. Легко интегрируется, есть набор дополнительных компонентов.

### Особенности [14]:



4) **Universal Robots UR3e** – это меньший коллаборативный робот из нового семейства e-серии 6-ти осевых шарнирных манипуляторов датской компании Universal Robots.

| Достоинства:  | Недостатки:                   |
|---|-------------------------------|
| Рис. 1.4. Universal Robots UR3e.<br>Специализация: универсальный, коллаборативный | Стоимость, руб.:<br>1 615 838 |
| Рабочий диапазон (макс), мм: 500 x 500  | Масса, кг: 11.2               |
| Степени свободы: 6  |                               |
| Полезная нагрузка, кг: 3  |                               |
| Доступ к ПО: 3D визуализация, режим обучения                                      | Питание: 100-240В (47-440Гц)  |
| Точность позиционирования, мм: 0.03   | Мощность(макс): 300Вт         |
| Рабочий орган: по выбору  |                               |

### Особенности [15]:

#### Образовательные



1) **DOBOT Magician** – многофункциональный настольный манипулятор с обратной связью для практического обучения от китайской компании DOBOT.

### Особенности [16]:

|                           |              |             |
|---------------------------|--------------|-------------|
| Рис. 1.5. DOBOT Magician. | Достоинства: | Недостатки: |
|---------------------------|--------------|-------------|

|   |                                |
|---|--------------------------------|
| Рабочий орган: схват, вакуумная присоска, лазерная гравировка, держатель ручки, экструдер для 3D-печати | Стоимость, руб.: 218 000       |
| Рабочий диапазон (макс), мм: 320  | Масса, кг: 3.4                 |
| Степени свободы: 4  |                                |
| Полезная нагрузка, г: 500   |                                |
| Доступ к ПО: 20 языков программирования   | Питание: 100-240В<br>(50/60Гц) |
| Точность позиционирования, мм: 0.2  | Мощность(макс): 78Вт           |
| Специализация: образовательный  |                                |



Рис. 1.6. Учебный робот SD1-4-320.

2) Учебный робот SD1-4-320 – российский аналог DOBOT Magician, производимый компанией SAGA Technologies и предназначенный для ознакомления учащихся основам робототехники, с целью дальнейшего внедрения робототехники в промышленном производстве [17].

#### Особенности:

| Достоинства:                             | Недостатки:                    |
|--|--------------------------------|
| Рабочий орган: аналогичен DOBOT Magician | Стоимость, руб.: 350 000       |
| Рабочий диапазон (макс), мм: 320         | Масса, кг: 3.4                 |
| Степени свободы: 4                       |                                |
| Полезная нагрузка(макс), г: 250          |                                |
| Доступ к ПО: Scratch, C                  | Питание: 180-240В<br>(50/60Гц) |
| Точность позиционирования, мм: 0.2       | Мощность(макс): 100Вт          |
| Специализация: образовательный           |                                |



Рис. 1.7. Hiwonder xArm  
ESP32 robotic arm.

3) **Hiwonder xArm ESP32 robotic arm** - роботизированный манипулятор от гонконгской компании Hiwonder предназначенный для освоения основ мехатроники, электроники и манипуляционных действий. Присутствует камера технического зрения для автоматического обнаружения объекта, его сортировки по цветам.

#### Особенности [18]:

| Достоинства:                      | Недостатки:                               |
|-----------------------------------|---|
| Масса, кг: ~ 1                    | Стоимость, руб.: 37 500                   |
| Питание: 7.5В / 6А                | Полезная нагрузка, г: нет данных          |
| Специализация:<br>образовательный | Точность позиционирования, мм: нет данных |
| Рабочий диапазон (макс), мм: 360  |   |
| Доступ к ПО: C++, Mini-Python     |   |
| Степени свободы: 5                | Мощность(макс): нет данных                |
| Рабочий орган: схват              |   |



Рис. 1.8. Образовательный набор –

Робот «Манипулятор».

4) **Образовательный набор – Робот «Манипулятор»** - образовательный набор для сборки, программирования и наладки самостоятельно от российской фирмы IARDUINO.

#### Особенности [19]:

| Достоинства:           | Недостатки:                        |
|------------------------|------------------------------------|
| Стоимость, руб.: 7 490 | Масса, кг: нет данных              |
| Питание: 7.5В / 6А     | Полезная нагрузка, г: нет данных   |
| Специализация:         | Точность позиционирования, мм: нет |

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| образовательный                     | данных   |
| Рабочий диапазон (макс), мм:<br>360 | Сервоприводы: MG90S (2.2кгс*см/6В)<br>[20], SG90 (1.8кгс*см/4.8В) [21] |
| Доступ к ПО: Arduino IDE            |  |
| Степени свободы: 4                  | Мощность(макс): нет данных   |
| Рабочий орган: схват                |  |

### 1.3. Анализ представленных на рынке решений

Анализируя вышерассмотренные разработки роботизированных манипуляторов, можно выделить следующие существенные особенности:

- Промышленные и коллaborативные роботы с широким спектром специализации, обратной связью, 6 и больше степенями подвижности, большой полезной нагрузкой, открытым или удобным для пользователя доступом к ПО, и высокой точностью позиционирования, имеют большую массу, электрические потребления и высокую стоимость;
- Большинство образовательных роботов имеют 4 или 5 степеней свободы, имеют возможность дистанционного управления, максимальную полезную нагрузку не выше 500 г, разнообразие доступа к ПО и точность повторяемости движений меньшее чем в предыдущем случае;
- Большинство образовательных роботов не портативны в силу того, что требуют источник питания на переменном токе;
- Масса образовательных роботов колеблется в районе 1 – 3.5 кг, а стоимость 37 000 – 350 000 рублей;
- Образовательные роботы, цена которых приемлема для широкого круга покупателей, обладают малой прочностью и моментами сил.

## **1.4. Требования к разрабатываемому роботу**

Результатом анализа готовых решений явилось сформирование ряда требований к собственному разрабатываемому роботу:

- 1) Добиться не меньше 4, желательно 5, степеней подвижности робота для обеспечения маневренности рабочего органа и полного охвата пространства окружающего робота.
- 2) Разработать конструкцию места прикрепления рабочего органа и самого органа манипулятора таким, чтобы была возможность смены насадок и, в частности для схваты, захвата объектов различной конфигурации (симметрия и степень подвижности).
- 3) Разработать прочную, но при этом легкую конструкцию с конечной массой робота в районе 1 – 2 кг.
- 4) Учитывая вышеперечисленные требования к массе, добиться полезной нагрузки робота не меньше 150 г.
- 5) Обеспечить портативность и малые габариты робота в сложенном состоянии с целью рационального использования пространства.
- 6) Обеспечить дистанционное управление роботом с помощью удобного и интуитивно понятного для пользователя устройства управления.
- 7) Обеспечить быструю заменимость важных электронных компонентов с целью исключения надобности в приобретении или изготовлении новой платы.
- 8) Добиться низкого энергопотребления для портативности и низкой стоимости содержания робота.
- 9) Обеспечить открытость доступа к ПО с целью предоставления возможности модернизации и подстройки робота под конкретные задачи.

## **ГЛАВА 2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ РОБОТА**

Данная глава будет посвящена конструкторской части разрабатываемого робота, обоснованию выбора тех или иных видов кинематических пар, а также разбору возникших в процессе проектирования трудностям и их решениям.

Для ускорения процесса разработки и последующего расширения функциональности робота было необходимо его разбиение на составные части такие как:

- Манипулятор:
  - Рабочий орган (схват);
  - Исполнительный механизм;
  - База;
- Пульт управления.

Далее, к каждой вышеперечисленной составляющей робота были сформулированы основные требования по следующим направлениям:

- Функциональность, в которой изложены выполняемые каждой частью функции, удовлетворяющая к пунктам 1.4;
- Физические характеристики такие как масса, прочность, термическая износостойкость.

Касательно самой реализации решений, удовлетворяющих предъявленным требованиям, процесс можно разделить на:

- Выбор концепции;
- 3D -моделирование в САПР;
- Изготовление, в частности печать на 3D –принтере;
- Тестирование.

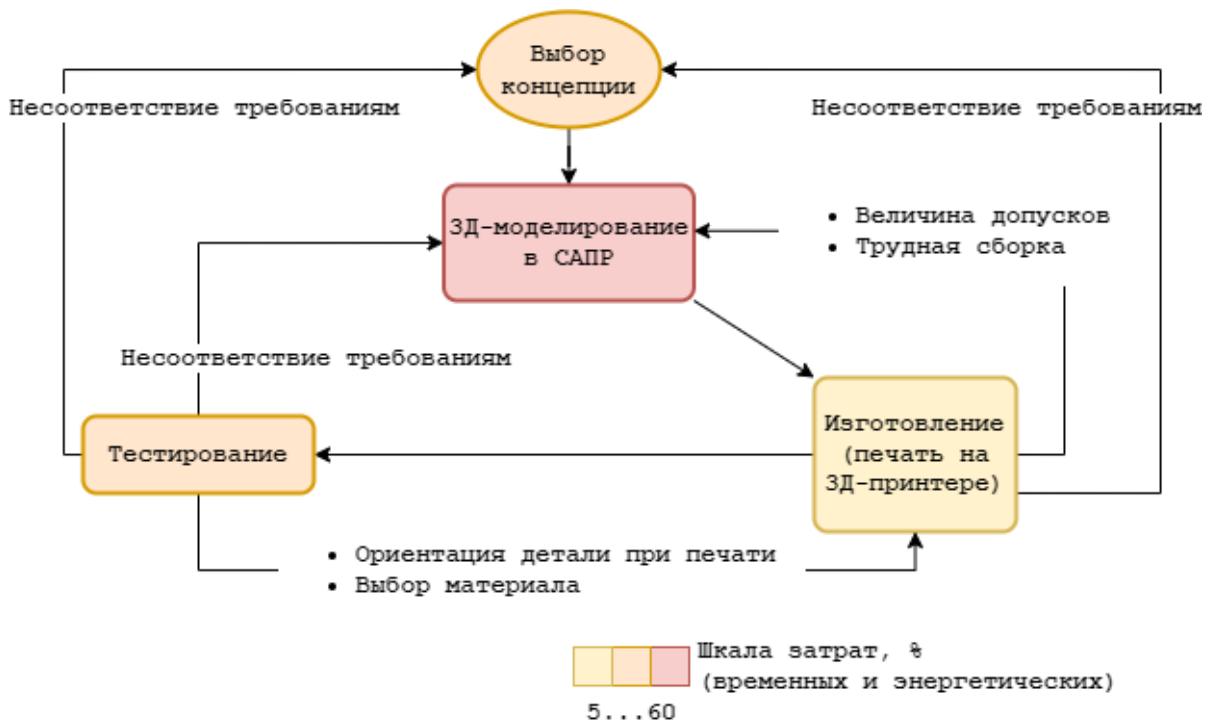


Рис. 2.1. Процесс разработки составных частей робота

Перед тем как рассмотрим каждую составную часть робота, стоит уделить внимание на выборе системы автоматизированного проектирования (САПР). В данной работе использовался САПР T-Flex CAD от российской компании Топ Системы. В данное ПО имеется возможность параметрической 2D и 3D моделирования, разработки конструкторской документации по ЕСКД [22]. Имеются коммерческие и бесплатные версии, а также предназначенные для учебных заведений, в частности НИЯУ МИФИ [23]. Стоит отметить наличие online учебных пособия [24] и обучающих видеоуроков [25].

Также, для справок, 3D печать производилась на принтерах Tevo Flash (диаметр сопла 0.4 мм) и Tornado (0.6 мм) с использованием пластиков с диаметром прутка 1.75 мм от российского производителя FD Plast.

Табл. 2.1. Параметры пластиков от фирмы FD Plast [29]

| Вид                                   | PETG      | PLA       | TPU        | NYLON      |
|---------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| Морозо/теплостойкость                 | -40...+75 | -20...+50 | -60...+120 | -60...+142 |
| Ударная прочность по Изоду, кгс·см/см | 40-42     | 38-41     | -          | 135        |
| Предел прочности при изгибе, МПа      | 78-80     | 81-83     | -          | 61-67      |

|                     |                 |       |       |          |
|---------------------|-----------------|-------|-------|----------|
| Применение в роботе | Функ.<br>деталь | Декор | Кожух | Шестерня |
|---------------------|-----------------|-------|-------|----------|

## 2.1. Манипулятор

### 2.1.1. Рабочий орган (схват)

С целью дальнейшей модификации манипулятора, требовалось разработать съемные рабочие органы, в частности схват описанный в данной работе, и соответствующее место их прикрепления к исполнительному механизму манипулятора.

- Функциональность.

о Захват объектов различной конфигурации:

- Симметрия: теннисные мячи, алюминиевые банки, задвижки клиновые, рычаги, бабочки и т.д.;
- Степень подвижности: рычаги (1 степень), дверный ручки (1 или 2 степени), плоские объекты (2 или 3 степени) и т.п.

о Удержание полезного груза массой не менее 150 г.

- Физические характеристики.

о Массу сборочной детали сократить до разумных пределов без потери прочностных характеристик с целью уменьшения момента инерции всего манипулятора;

о Обеспечить прочность всего рабочего органа и его частей, участвующих непосредственно в захвате, необходимую для выдерживания механических импульсов до 56,03 кг\*м/с.

Механический импульс рассчитан как:

$$p = m_{p,\max} * \sqrt{2 * g * 2 * h_{\text{кя}}} \quad (1), \text{ где } m_{p,\max} = 10 \text{ кг} - \text{максимальная масса робота (мобильная платформа и манипулятор)}, h_{\text{кя}} = 0.8 \text{ м} - \text{высота кубических ячеек в испытательном полигоне [26].}$$

о Обеспечить термическую износостойкость в температурном диапазоне не меньше той для аппаратной части (-40...+85 °C) [29] и сервоприводов (0...+55 °C) [20].

Далее разберем 5 кейсов по процессу реализации решений касательно механизма захвата и по электроприводному передаточному механизму.

Прежде чем приступить к анализу ошибок, уделим внимание на концепции механизма захвата, в качестве которой была выбрана анатомия человеческого пальца. Человеческий палец представляет собой открытую кинематическую цепь, где в качестве звеньев выступают фаланги, сочленений - суставы. Поворот звеньев происходит за счет сжатия и растяжения связок. Обычно для приведения «пальцев» во вращение в антропоморфных протезах рук используются по одному маленькому электроприводу на каждом пальце, в частности установленный на проксимальной фаланге как в Vincent iLimb, или один большой и мощный на ладони как Michelangelo hand (Otto Bock) который управляет каждым пальцем путем натяжения гибких синтетических нитей [28]. Вышеупомянутый подход позволяет добиться высокой гибкости и развивать большие крутящие моменты, что неизбежно приводит к увеличению массы механизма. В данной дипломной работе, с учетом требований к легкости конструкции и ограниченному набору команд (захват/удержание), был применен местами схожий или отличающийся подход. Было решено разработать:

1. Три пары механических «пальцев» для захвата большей поверхности объектов различной конфигурации;
2. Каждый «палец» в виде кинематической цепочки из трех фаланг, по двум противоположным сторонам которых будут пролегать гибкие связи (в качестве связей могут выступать синтетические нити как капрон или нейлон, разные виды резин и т.п.). Вид «пальца» в сборе и с продольным

разрезом без гибких связей и подшипника в нижнем сочленении проксимальной фаланги показан на рисунке 2.2;

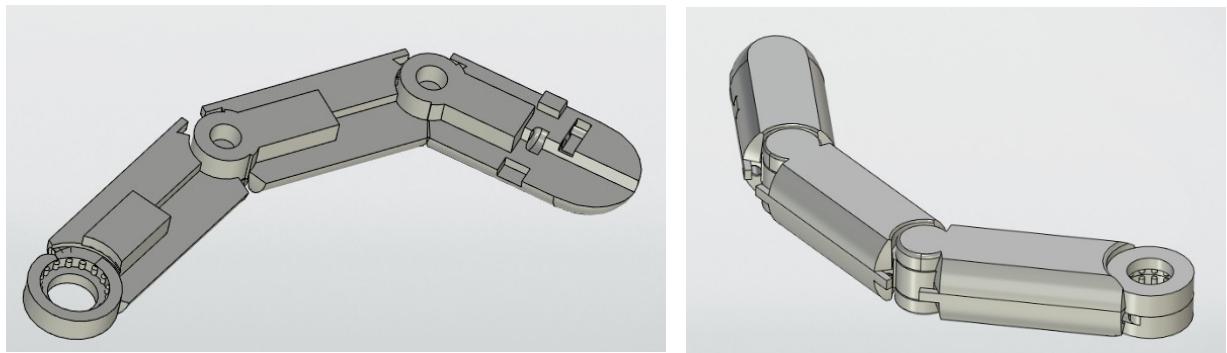


Рис. 2.2. Механический «палец» без гибких связей и подшипника в нижнем сочленении нижней фаланги. Слева в продольном разрезе, справа в сборке.

3. Передаточный механизм от одного электрического привода к трем парам «пальцев», с возможностью дальнейшего поворота каждой пары по отдельности в случае остановки любой другой. Для реализации данного механизма был использован пилообразный профиль основания зубчатых колес показанный на рисунке 2.3. Меняя угол наклона зубьев пильы и величину упругой деформации пружины можно добиться требуемой величины усилия захвата в рамках крутящего момента электрического привода.

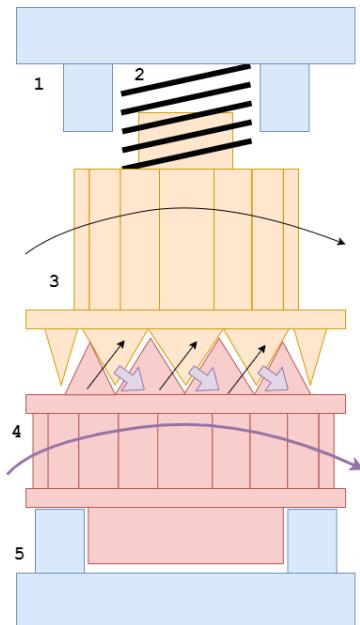


Рис. 2.3. Передаточный механизм для одного «пальца».

1 и 5 – крышка и дно конструкции одного слоя «кисти» (всего слоев три, на каждую пару «пальцев»), 2 - пружина, 3 и 4 – ведущая и ведомая шестерни.

Далее разберем кейсы с целью выявления недочетов и предпосылок к модификации.



Рис. 2.4. Первая модель механизма захвата для одной пары пальцев.  
Слева в сложенном состоянии, справа при максимальном повороте.

### Кейс 1. «Резина тянется»

#### Особенности:

- Шестерни: пластик PETG; модуль зубьев 0.25 мм;
- Материал «пальцев»: пластик PETG;
- Гибкая связь: пластик ТРУ диаметром 1.75 мм.

| Достоинства:   | Недостатки:   |
|----------------|---|
| Легкая сборка. | <p>При достижении крайних раскрытий положений, а также при захвате объекта резина удлиняется в силу протаскивания шестернями, что приводит к:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Малой величине прижимающей силы;</li> <li>• Потере симметрического поворота «пальцев» за счет остаточной деформации при захвате объекта несимметричной формы.</li> </ul> |

**Вывод:** Пластик ТРУ фирмы FD Plast в виде монопрутка диаметром 1,75 мм не пригоден для передачи моментальной и больших сил натяжения.

## Кейс 2. «Толстая леска для тунца»

### Особенности:

- Передаточный механизм тот же как в предыдущем случае;
- Присутствует замена типа гибкой связи (полиамидная монофильная леска диаметром 1 мм, разрывная нагрузка 34,0 – 37,0 кгс [30]).

| Достоинства:  | Недостатки:  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Легкая сборка;</li><li>• Моментальная передача сил натяжения.</li></ul> | При небольших противодействующих моментах сил во время захвата объектов шестерни не способны протащить леску, из-за чего зубья быстро стираются и теряют функциональность. |

**Вывод:** Монофильная полиамидная леска диаметром 1 мм обладает механической износостойкостью выше чем зубчатое колесо (модуль 0.25 мм) изготовленное с пластика PETG фирмы FD Plast.

## Кейс 3. «Крутите барабан!»

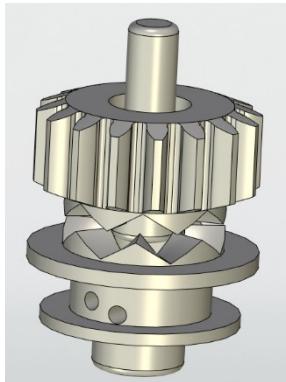


Рис. 2.5. Передаточный механизм (барабан + шестерня) поворота одного «пальца».

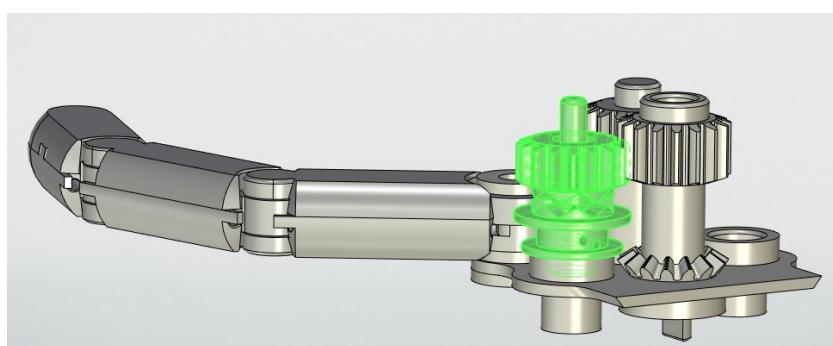


Рис. 2.6. Вторая модель механизма поворота одной пары «пальцев». Вид сбоку на сборку для одного «пальца».

### Особенности:

- По одной гибкой связи намотанный на барабан для каждого «пальца»;

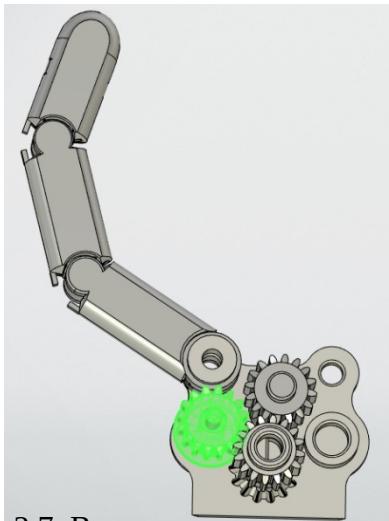


Рис. 2.7. Вторая модель механизма поворота одной пары «пальцев». Вид сверху на сборку для одного

- Крутящий момент от электропривода к механизму поворота передается через коническую зубчатую передачу;
- Шестерни: пластик износостойкий NYLON, модуль зубьев 0.87 мм;
- Материал функциональных деталей (барабан, фаланги пальцев, корпус «кисти»): пластик PETG;
- Гибкая связь: монофильная полиамидная леска диаметром 1 мм. (см. пред. кейс)

| <b>Достоинства:</b>  | <b>Недостатки:</b>  |
|--|---|
| Данный подход позволяет добиться дополнительной гибкости в повороте «пальцев» в рамках одной пары, т.к. каждый «палец» обладает независимым от другого механизма поворота; | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Долгая сборка;</li> <li>• Толстая леска имеет эффект памяти что сказывается на плавности движений «пальца» и величине прикладываемых усилий для его поворота.</li> </ul> |

### **Вывод:**

- Передаточный механизм поворота отдельно для каждого «пальца» предоставляет дополнительную гибкость в движении и моментальную передачу малого изменения крутящего момента на движение «пальца»;
- Монофильная полиамидная леска диаметром 1 мм при хранении в натянутом состоянии на открытом воздухе с влажностью около 50-60% и подверженный воздействию люминесцентных ламп дневного света теряет свойство упруго деформироваться, что приводит к снижению плавного поворота «пальцев» и увеличению величины прикладываемых моментов сил.

На этом кейсы по оптимизации передаточного механизма поворота «пальцев» заканчиваются. Был произведен переход от полиамидной лески к полиамидной (капроновой) нитке (диаметр 1 мм; линейная плотность 375 текс; разрывная нагрузка 15 кгс [31]) в качестве гибкой связи. На данный момент тестируется последний вариант механизма (барабанный) с изменением угла наклона зубьев пилообразного профиля (в районе 30-35°). Стоит отметить что при угле наклона 45° функция пилообразного механизма не работала (отсутствовал скачок ведомой шестерни при захвате объекта).

Далее рассмотрим последние 2 кейса касательно передаточного механизма от электропривода к механизму поворота «пальцев».

#### **Кейс 4. «Малыш и Карлсон: Малыш»**

##### **Особенности:**

- Электропривод: мотор для квадрокоптера Syma X5 с коллекторным двигателем (макс. питание 5В [32]);
- Подключение к питанию в виде концентрических колец в «запястье» манипулятора осуществлялся через скользящие металлические щётки;
- 2 шестерни с передаточным отношением 15:1 напечатаны из пластика PETG, модуль 0,6 мм.

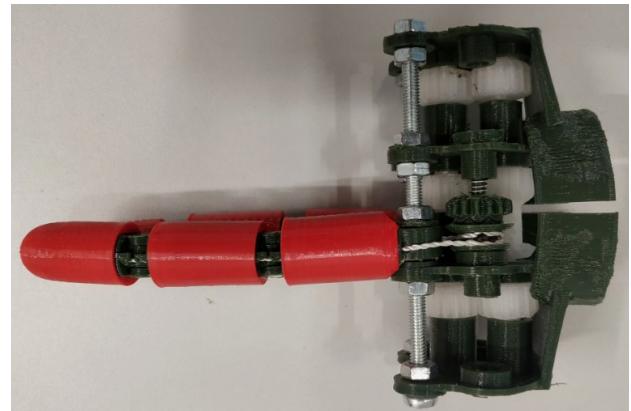


Рис. 2.8. Конечная модель механизма поворота «пальцев». Вид сбоку на сборку для одной пары «пальцев».

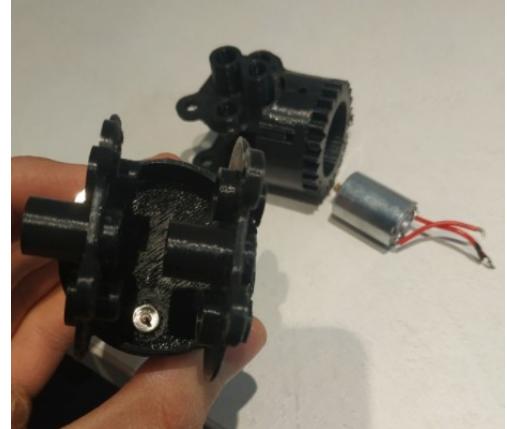


Рис. 2.9. Первая и вторая модели передаточного механизма от электропривода к «пальцам». Первая на ближней перспективе, вторая – на дальней.

| <b>Достоинства:</b>   | <b>Недостатки:</b>   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Легкая масса;</li> <li>• Низкая стоимость [32].</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Сложность конструкции для дальнейших модификаций (смена рабочего органа);</li> <li>• Малое передаточное число, что привело к выводу привода из строя при небольших нагрузках;</li> <li>• Низкая прочность на изгиб оси вращения с пластика PETG диаметром 15 мм.</li> </ul> |

#### **Вывод:**

- Скоростные моторы для квадрокоптера, в частности Syma X5, с двигателем коллекторного типа не пригодны для обеспечения больших крутящих моментов;
- Передаточные механизмы с приводом на оси вращения открывают возможности для увеличения специализации манипулятора (смена насадок).

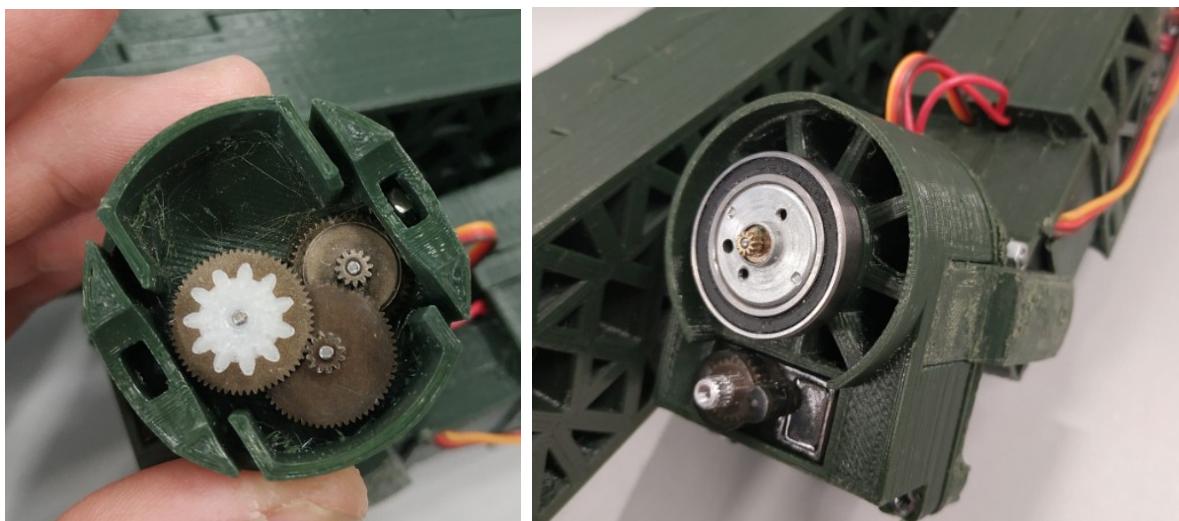


Рис. 2.10. Вторая (конечная) модель передаточного механизма от электропривода к «пальцам». Слева сам механизм, справа – место прикрепления к электроприводу в составе исполнительного механизма манипулятора.

#### **Кейс 5. «Малыш и Карлсон: Карлсон»**

## **Особенности:**

- Электропривод: мотор от сервопривода TD-8120MG (крутящий момент 22,8 кгс\*см / 7,2В, рабочее напряжение 4,8-7,2В [33]);
- Передаточное число шестерен от мотора до конической зубчатой передачи: 1:107,5;
- Материал шестерен: авиационный алюминий, латунь, пластик NYLON;
- Рабочий орган (схват) представлен в виде «кисти» которая крепится поверх мотора с подшипником.

| <b>Достоинства:</b>   | <b>Недостатки:</b>                   |
|---|--------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Значительно (почти в 7 раз) увеличенное передаточное отношение чем в предыдущей модели;</li><li>• Прочный, механически износостойкий материал зубчатых колес;</li><li>• Более мощный мотор;</li><li>• Возможность расширения функциональности в силу упрощения разработки рабочего органа;</li><li>• Повышенная прочность на изгиб за счет металлического корпуса мотора.</li></ul> | Увеличенная масса мотора (в 2 раза). |

## **Вывод:**

- Смещение мотора к центру привело к увеличению прочностных характеристик на изгиб оси вращения, возможности универсализации манипулятора за счет упрощенной разработки передаточного механизма рабочего органа.
- Использование более мощного мотора, прочных материалов для зубчатых колес и особенностей расположения привода позволило увеличения передаточного отношения.

Далее рассмотрим предъявляемые требования и процесс разработки исполнительного механизма манипулятора.

### **2.1.2. Исполнительный механизм**

Для данной составляющей манипулятора были предъявлены требования по маневренности, портативности, (малому размеру в сложенном состоянии) прочности и легкости.

- Функциональность.
  - о Транспорт и ориентация рабочего органа с полезной нагрузкой не менее 150 г к любой точке окружающего робота пространства;
  - о Сборка в компактные и портативные размеры.
- Физические характеристики.
  - о Степень подвижности должна быть не меньше 4, лучше 5;
  - о Масса сборочного механизма ограничена требованием к конечной массе всего робота в диапазоне 1-2 кг;
  - о Обеспечить прочность конструкции исполнительного механизма, как и рабочего органа, способной переносить механические импульсы до 56,03 кг\*м/с (для расчёта импульса см. (1)).
  - о Габариты собранного устройства ограничены в диапазоне (ВxДxШ, мм) не больше 350x400x400 [26];
  - о Обеспечить термическую износостойкость в температурном диапазоне не меньше той для аппаратной части (-40...+85 °C) [29] и сервоприводов (0...+55 °C) [20].

На данном этапе рассмотрения составных частей манипулятора следует привести формулы расчёта степени подвижности исполнительного механизма [34]:

$$n_{dof} = \lambda * (n - 1) - \sum_{i=1}^k (\lambda - f_i) \quad (2),$$

где  $n$  – число звеньев (включая землю),  $k$  – число сочленений,  $f_i$  – степень свободы  $i$ -ого сочленения,  $\lambda = 3$  для планарного механизма и 6 для сферического механизма.

Далее проведем анализ 4 кейсов в которых производится разработка исполнительного механизма с применением различного рода передаточных связей. Стоит отметить на одинаковость кинематических пар пятого (число условий связи, или отнятых степеней подвижности) класса, а именно вращательных, примененных во всех механизмах в ниже рассматриваемых кейсах. Данный подход стал результатом применения одного сервопривода в каждом сочленении с целью быстрой и упрощенной разработки конструкции.

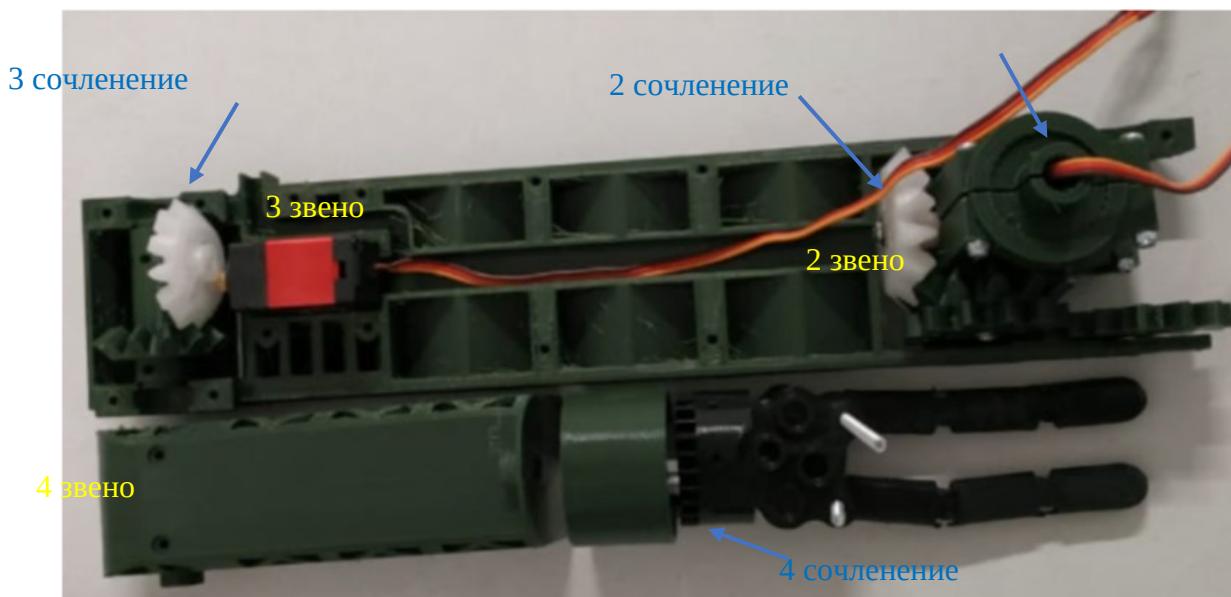


Рис. 2.11. Первая модель исполнительного механизма манипулятора.

### Кейс 1: «Таран»

#### Особенности:

1 сочленение

- Число степеней подвижности: 4;
- Передачи сочленениях: цилиндрическая – 1, коническая – 2,3;
- Масса сборочной конструкции без базы: ~ 1.56 кг;
- Габариты сборки в сложенном виде (ВxДxШ, мм): 135x300x207.

| Достоинства:   | Недостатки:   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Высокая прочность;</li> <li>Малые габариты базы.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Большая масса;</li> <li>Большой момент инерции за счет сервопривода в третьем сочленении;</li> <li>Плохая гибкость из-за 4 степеней свободы, что означает невозможность захвата объектов с различной ориентацией в пространстве;</li> <li>Низкая прочность участка третьего звена во втором сочленении.</li> </ul> |

### Вывод:

- Необходимо смещение сервопривода в третьем сочленении от периферии ко второму звену, и при этом не допущение потери компактности второго звена;
- Требуется пересмотр места наибольшего напряжения звеньев с целью снижения массы конструкции.

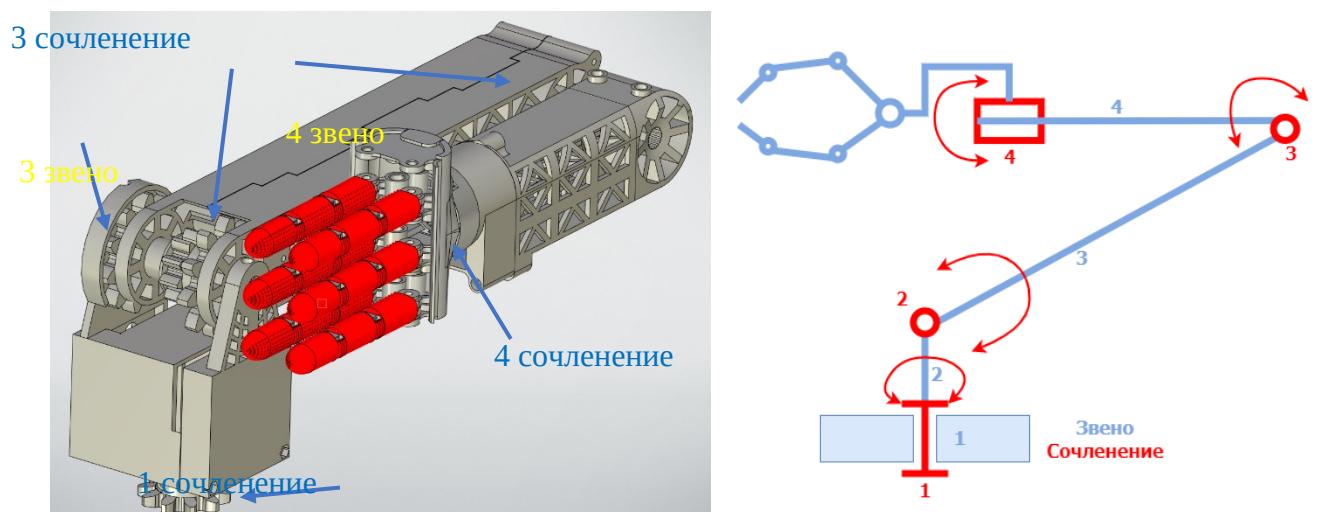


Рис. 2.12. Вторая модель исполнительного механизма манипулятора.

Справа представлена сборка 3D-модели, слева – кинематическая схема.

### Кейс 2: «Декоративный кран 4.0»

2 сочленение

### **Особенности:**

- Число степеней подвижности: 4;
  - Передачи в сочленениях: 1 и 2 – цилиндрическая, 3 – ременная;
  - Ремень:
    - пластик ТРУ, заполнение 100%, модуль зубьев 2 мм;
    - полиамидная монофильная леска.
- Масса сборочной конструкции без базы:  
~ 1.18 кг;



Рис. 2.13. Резиновый ремень.

| <b>Достоинства:</b>   | <b>Недостатки:</b>  |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Высокая прочность всего исполнительного механизма;</li><li>• Низкий момент инерции в силу переноса сервопривода к месту второго сочленения.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Большие погрешности в позиционировании (<math>\pm 17 - 35</math> мм) в результате паразитных деформаций в ремнях (растяжение в резине, слабое натяжение в леске);</li><li>• Низкая маневренность за счет 4 степеней свободы;</li><li>• Большая масса из-за лишней «декорации», не участвующей в обеспечении прочности конструкции;</li><li>• Большие габариты базы.</li></ul> |

- Габариты сборки в сложенном виде (ВxДxШ, мм): 200x300x150.

### **Вывод:**

- Использование полиамидной монофильной лески диаметром 1 мм и зубчатого колеса с внутренним зацеплением (модуль зуба 2 мм и толщина обода 2 мм) напечатанным со 100% заполнением из пластика ТРУ фирмы FD Plast приводит к неточному позиционированию ( $\pm 5 - 10^\circ$ );

- Добавление одной степени подвижности является необходимым для полноценного функционирования манипулятора.

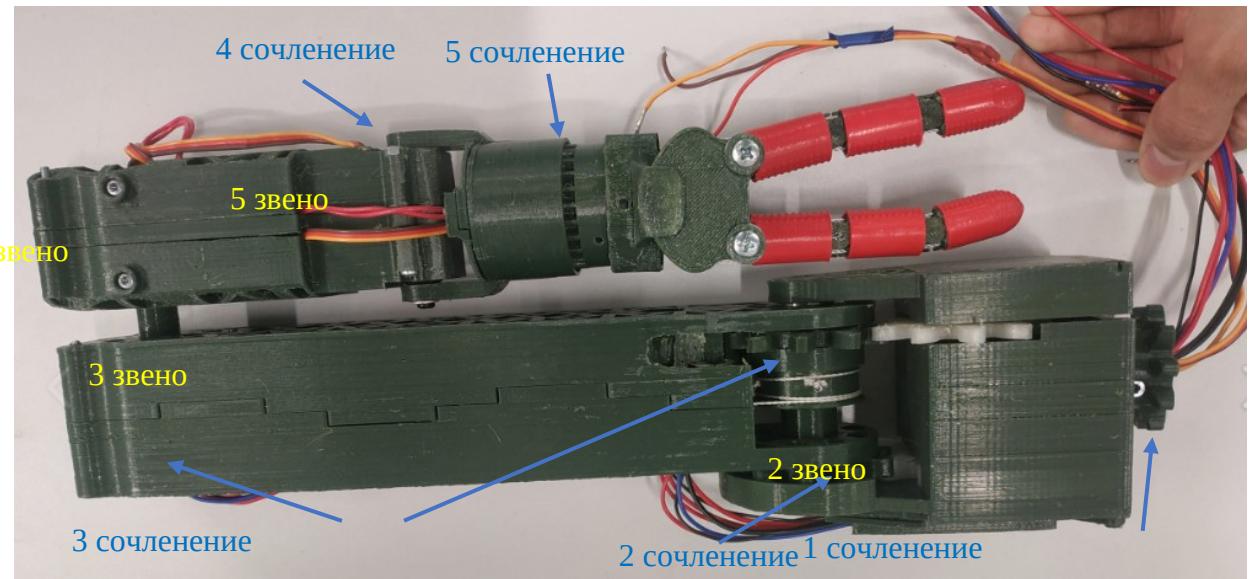


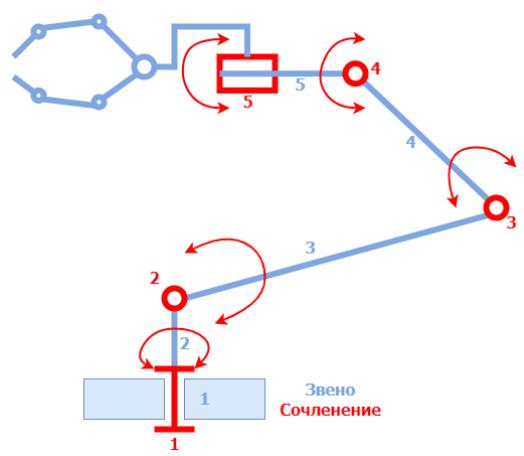
Рис. 2.14. Третья модель исполнительного механизма манипулятора.

### Кейс 3: «Декоративный кран 5.0»

**Особенности:**

- Число степеней подвижности: 5;
  - Передачи в сочленениях: 1 и 2 - цилиндрическая, 3 – ременная;
  - Ремень: капроновая нить [31];
  - Масса сборочной конструкции без базы: ~ 1.24кг;

| Достоинства:   | Недостатки:  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Повышенная гибкость в движении;</li> <li>Пониженные погрешности позиционирования (<math>\pm 3,5 - 7,0</math> мм);</li> <li>Высокая прочность конструкции;</li> <li>Низкий момент</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Большая масса за счет «декораций»;</li> <li>Большие габариты базы.</li> </ul> |



инерции.

- Габариты сборки в сложенном виде (ВхДхШ, мм): 200x300x150.

### Вывод:

- Полиамидная (капроновая) нить (диаметр 1 мм, разрывная нагрузка 15 кгс и линейная плотность плотностью 375 текс [31]) использованная в ременной передаче позволяет снизить погрешности в позиционировании и инерционность передачи.

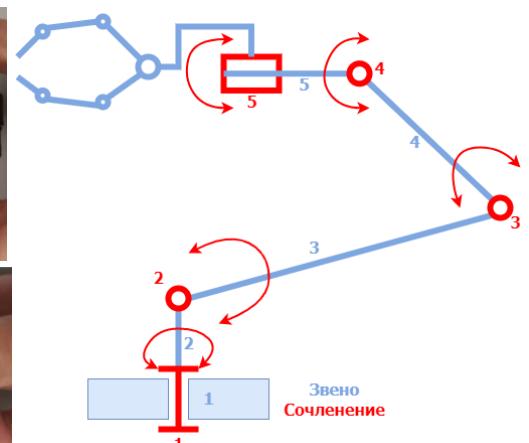
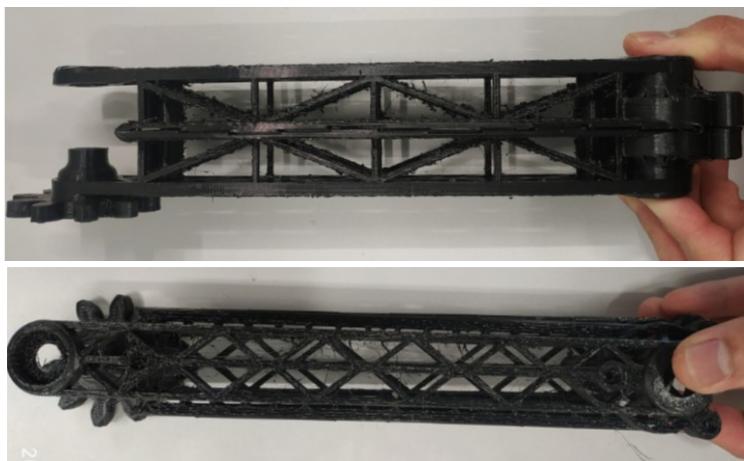


Рис. 2.15. Справа приведен вид третьего звена третьей (облегченной) модели исполнительного механизма, слева – кинематическая схема манипулятора.

### Кейс 4: «Функциональность превыше всего»

#### Особенности:

- Число степеней подвижности: 5;
- Передачи в сочленениях: 1 и 2 - цилиндрическая, 3 – ременная;
- Ремень: капроновая нить [31];
- Масса сборочной конструкции без базы: ~ 0.94 кг;
- Габариты сборки в сложенном виде (ВхДхШ, мм): 200x300x150.

| Достоинства:   | Недостатки:  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Уменьшенная масса;</li> <li>Повышенная гибкость в движении;</li> <li>Пониженные погрешности позиционирования</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Большие габариты базы.</li> </ul> |

( $\pm 3,5 - 7,0$  мм);

- Высокая прочность конструкции;
- Низкий момент инерции.

**Вывод:** Анализ участков наибольшей деформации позволил существенно снизить массу конструкции исполнительного механизма.

### 2.1.3. База

- Функциональность.
  - о Содержание в себе электронной аппаратуры, сервопривода и источника питания;
  - о Портативность: возможность переноса и легкого монтажа на плоские поверхности;
  - о Естественная вентиляция печатной платы.
- Физические характеристики.
  - о Масса конструкции ограничена требованием к конечной массе всего робота в диапазоне 1-2 кг;
  - о Обеспечить прочность конструкции необходимой для выдерживания



Рис. 2.16. База манипулятора.

- нагрузок со стороны исполнительного механизма манипулятора;
- о Габариты желательно уместить в (ВхДхШ, мм) 70x128x70. (данные касательно определенной мобильной платформы, разрабатываемой для участия в Кубке РТК [26]);
  - о Термостойкость в диапазоне не меньше той для аппаратной части (-40...+85 °C) [29] и сервоприводов (0...+55 °C) [20].

#### Особенности:

- Масса вместе со всеми компонентами: ~0.29 кг;
- Габариты конструкции (ВxДxШ, мм): 66x120x81.

### **2.1.3. Пульт управления**

- Функциональность.
  - Содержание в себе электронной аппаратуры и источника питания (4 гальванических элементов типа AAA);
  - Возможность доступа к печатной плате для смены микроконтроллера и модуля связи;
  - Эргономичность.
- Физические характеристики.
  - Масса корпуса ограничена в диапазоне 200 – 300 г. Беспроводной контроллер Sony DualShock 4 весит около 210 г [35];

#### **Особенности:**

- Масса вместе со всеми компонентами: ~ 295 г;
- Габариты конструкции (ВxДxШ, мм): 51x142x92;
- Материал: пластик PLA.



Рис. 2.18. Пульт управления.

Вид спереди.

## ГЛАВА 3. АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ РОБОТА

В данной главе будут изложены процессы разработки аппаратной части манипулятора и пульта управления, представлены обоснования выбора тех или иных электронных компонентов, а также рассмотрены возникшие во время изготовления печатных плат проблемы и их решения.

### 3.1. Выбор электронных компонентов

С целью унификации и взаимозаменяемости было решено использование одинаковых микроконтроллеров (МК) и модулей связи для обеих устройств.

- В качестве МК применен STM32F103C8T6 с 32-битным ARM процессором. Для данного МК в интернете существует множество источников для самообучения что позволит широкому кругу пользователей при желании расширить возможности робота. Но существенными преимуществами являются [36]:
  - о Тактовая частота: до 72 МГц;
  - о Объем данных: 64 KB Flash, 20 KB SRAM;
  - о Доступ на регистровом уровне;
  - о Габариты (ДхШхВ, мм): 53 x 36 x 12;
  - о Разнообразие периферии
    - 9 интерфейсов связи;
    - 7 таймеров;
    - 37 портов ввода/вывода данных.
  - о Стоимость, руб.: от 103.



Рис. 3.1. МК

- Для связи двух МК используется модуль связи на базе микросхемы NRF24L01+PA+LNA (с внешней антенной и усилителем) подключаемый к МК по интерфейсу Serial Peripheral Interface (SPI). Модуль содержит в себе микросхему, пассивные SMD компоненты, антенну, SMA разъем

чип RFX2401C, который объединяет в себе микросхему коммутации усилителя мощности PA (Power Amplification) для передачи и малошумящий усилитель LNA (Low-Noise Amplifier) для приема данных. Подключается к разрабатываемым платам через разъем PLD-8. Помимо того, что прием и передача данных производится по радиоканалу в ISM (Industrial, Scientific, Medical) диапазоне частот 2,400...2,525 ГГц, существует еще ряд достоинств [29][37]:

- о Ток потребления: 900 нА / Power Down, 26 мКА / Standby, 115 мА / передача, 45 мА / прием;
- о Дальность связи: до 1000 м;
  - о Количество каналов: 126;
  - о Максимальная скорость обмена данными: 2Мбит/с;
- о Стоимость, руб.: от 100.



Рис. 3.2. Модуль связи.



Рис. 3.3. Информационный дисплей.



Рис. 3.4. Сервоприводы.

- Информационный дисплей на пульте управления представлен в виде графического OLED экрана в силу малых размеров (0,96 дюймов) и высоким разрешением (128x64 пикселей). Также, обмен данными с МК производится посредством двухпроводной линии интерфейса Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C) [38].
- Для приведения частей исполнительного механизма манипулятора в движение использовались сервоприводы TIANKONG TD-8120MG (4 шт.) [33] и Tower Pro MG90S [20]. Выбор обоснован тем, что:
  - о Крутящий момент: 22,8 кгс\*см / 7,2В; 2.2 кгс\*см / 6,6В;
  - о Металлические шестерни;

о Масса, г: 56 / 13,4;

- Для регулировки скорости направления вращения коллекторного мотора, используемого для поворота «пальцев» в рабочем органе, был применен двухканальный драйвер моторов на базе микросхемы TB6612FNG от фирмы TOSHIBA [43]. Напряжение питания 3,3В, имеет защиту по перенапряжению, температуре и короткому замыканию. Подключается к плате путем двух разъемов PBD-8 1x8.



Рис. 3.5. Драйвер мотора.

- Для удобства управления движением манипулятора было решено использование джойстика модуля KY-023 (оси X и Y) [39] и несколько штук тактовых кнопок.



Рис. 3.6. Джойстик.

- В качестве понижающих преобразователей постоянного напряжения использовались модули на базе микросхем XL4005 [40], MP2307 [41], AMS1117 [42]. Первые два модуля позволяют выдавать на выход напряжения в диапазонах 0,8В – 30В и 0.925В – 20В при величинах на входе 5-32В и 4.75В – 23В соответственно. А последний модуль способен обеспечить стабильное выходное напряжение 3.3В при входном до 15В согласно документации, хотя на деле получалось на выходе 3.127В чего так же достаточно для питания МК.



Рис. 3.7. Преобразователи напряжений.

Далее рассмотрим процесс разработки печатных плат устройства пульта управления и манипулятора, включающая в себя:

- Архитектура;
- Моделирование (схемотехника и топология);
- Изготовление.

В данной работе для 3D-проектирования печатных плат использовался бесплатная учебная версия САПР Altium Designer и обучающие материалы [44]. Для удобства размещения использованных электронных компонентов на печатной плате была создана собственная библиотека компонентов (рис. 3.8) с указанием механических границ во избежание перекрытий компонентов на одном слое (рис 3.9).

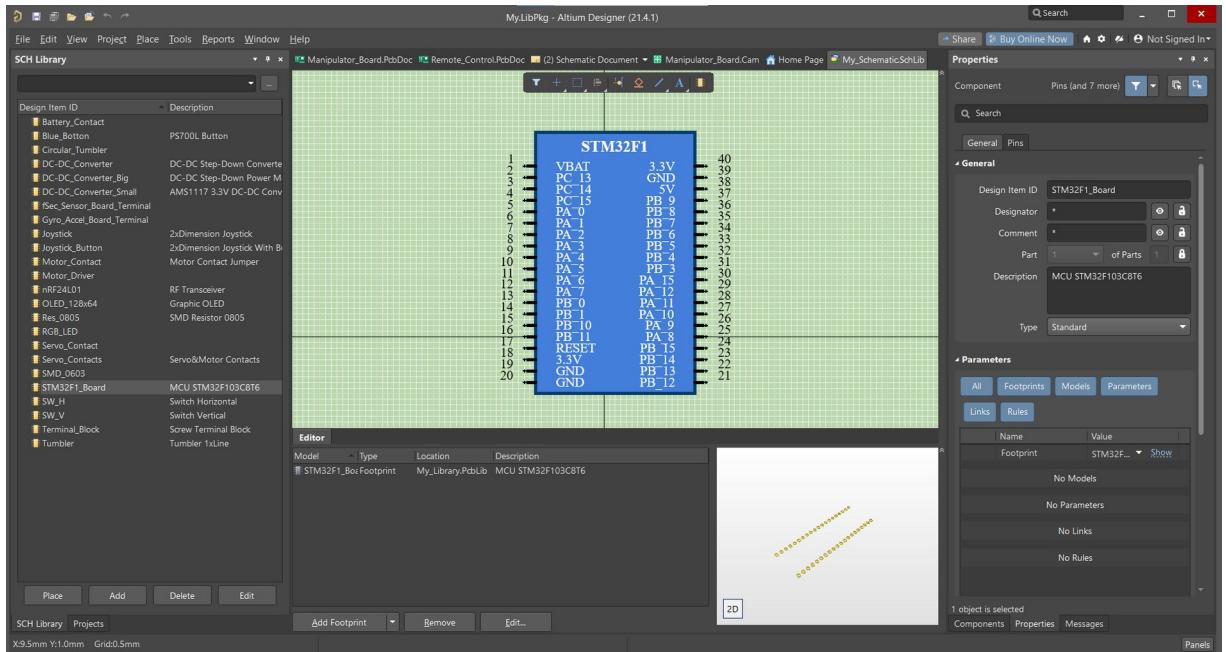


Рис. 3.8. Схемотехническое представление MK STM32F103C8T6  
в составе собственной библиотеки компонентов. Внизу на белом фоне указано  
топологическое представление компонента (размеры и относительное расположение  
контактных площадок).

Рис. 3.9. Расположение компонентов на двухсторонней печатной плате пульта управления с указанием их физических границ в механическом слое Mechanical 1. Компоненты границы которых перекрываются расположены на разных слоях платы.

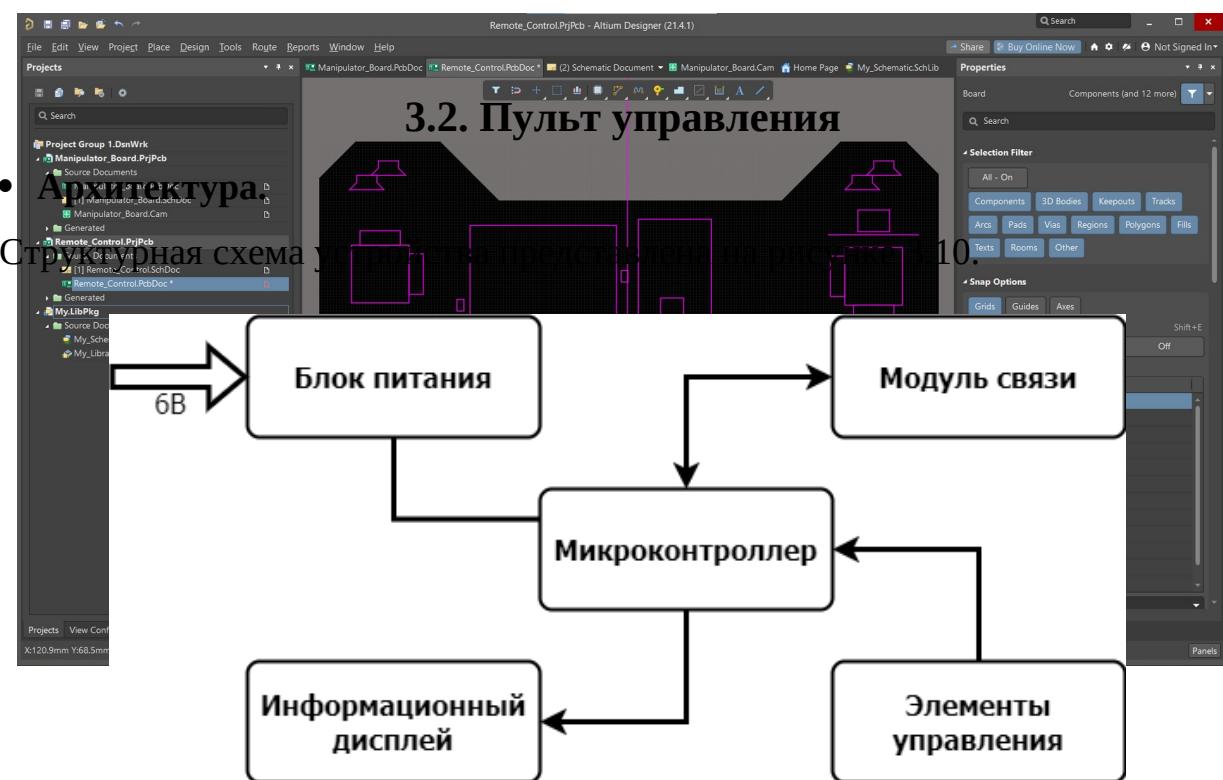


Рис. 3.10. Структурная схема пульта управления.

Стрелками указаны потоки данных.

## • Моделирование.

- о Принципиальная электрическая схема разработанного устройства представлена на рисунке 3.11.

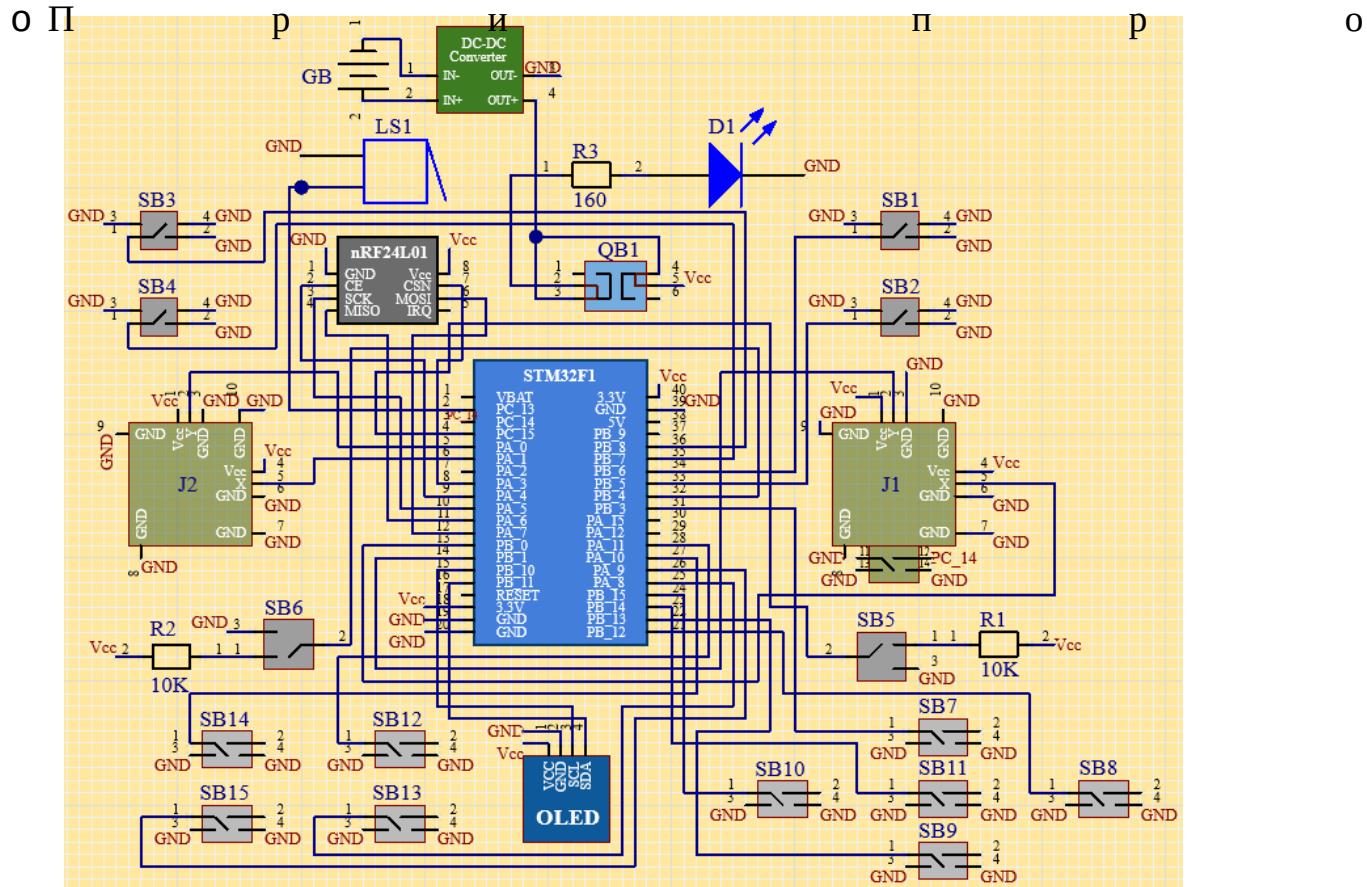


Рис. 3.11. Принципиальная электрическая схема пульта управления.

влияние высоковольтной линии питания от батареи 6В на сигнальные дорожки. В результате, силовые дорожки были расположены на слое с наименьшим количеством сигнальных линий, увеличены в ширине до 2 мм, укорочены по длине до 4 мм и отдалены от сигнальных линий в радиусе 10 мм. Топология схемы приведен на рисунках 3.12 и 3.13.

## • Изготовление.

Для изготовления печатной платы пульта управления применялась лазерно-утюжная технология (ЛУТ) [45].

Необходимые материалы:

- о Кусок двухстороннего текстолита размером 80x105x2 мм;
- о Глянцевая фотобумага в формате А6, 2 шт.;
- о Раствор для травления:  $H_2O_2$  (3%, 150 мл), лимонная кислота (30 г),  $NaCl$  (5 г);

- о Лазерный принтер, утюг;
- о Ёмкость для травления, кисточка, зубочистка, ацетон;
- о Кусок шлифовального листа 0 зернистости;

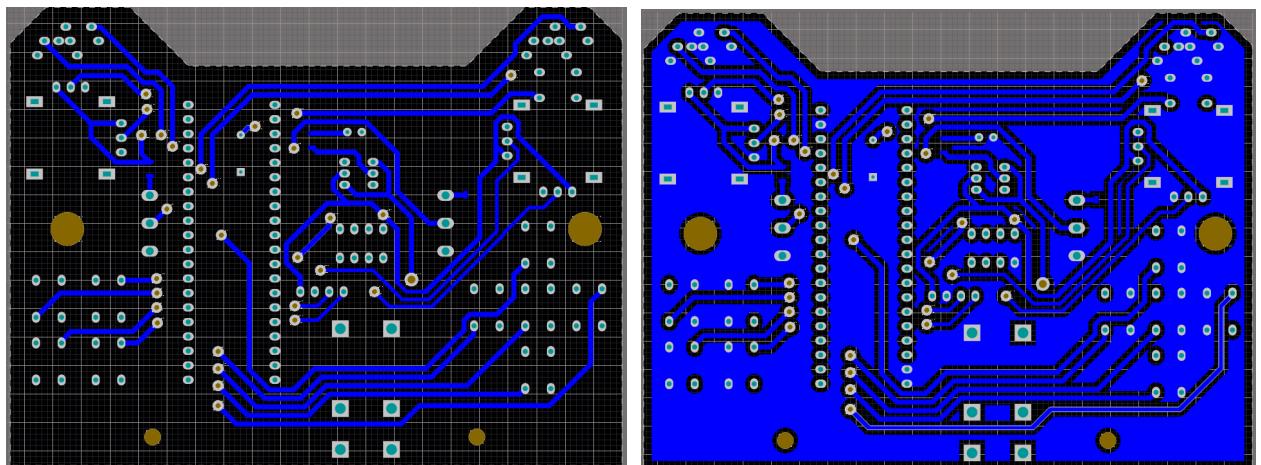


Рис. 3.12. Нижний слой топологии печатной платы пульта управления.

Слева четко видны большее число сигнальных линий на верхнем слое и отсутствие 6В силовых дорожек, справа – плата с полигоном земли.

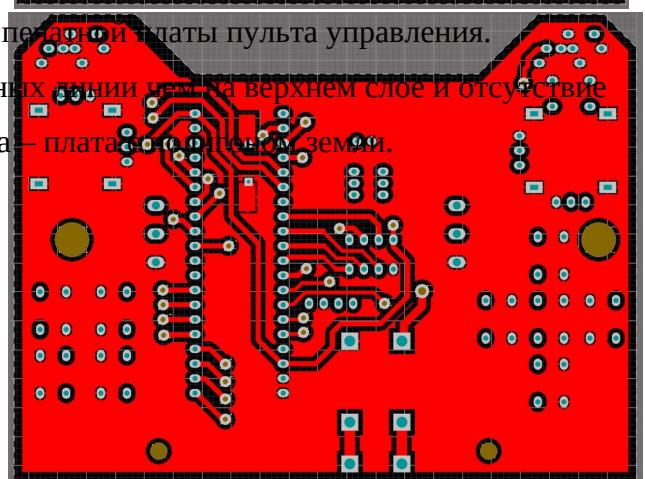
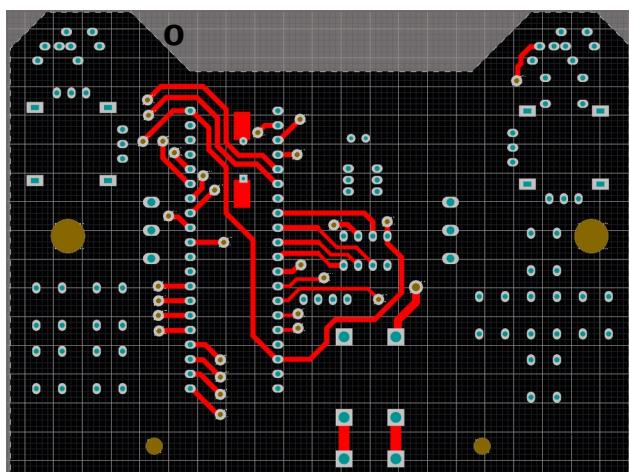


Рис. 3.13. Верхний слой топологии печатной платы пульта управления.

Слева четко видны сигнальные дорожки с толщиной 1 мм и 2 мм линия питания внизу, справа – плата с полигоном земли.

- о Металлические проводники диаметром 1 мм, припой,
- электроизоляционный лак.

Этапы изготовления платы:

1. Обрезка.

Из прямоугольного куска текстолита вырезалась необходимая форма печатной платы. Края обрабатывались для удаления шероховатых участков.

2. Подготовка макета.

Распечатывалась спроектированная топология печатной платы лазерным принтером на глянцевой фотобумаге (оба слоя) и обычной бумаге (любой из слоев) в оригинальном масштабе. Верхний слой топологии печаталась в отзеркаленном варианте.

3. Отверстия совмещения.

Данный этап не обязательен для односторонних печатных плат. Можно изготовить две односторонние печатные платы, а затем соединить их вместе с использованием сквозных отверстий. Топология, распечатанная на обычной бумаге, располагалась поверх текстолита и просверливались четыре отверстия на дальних углах платы с целью дальнейшего совмещения двух топологий.

4. Обработка текстолита.

Текстолит подвергся удалению от грязи, шлифованию шкуркой до образования по всей поверхности равномерно мелких шероховатостей, промыванию чистой водой и сушке бумажным полотенцем.

5. Нанесение топологии.

Обработанный текстолит, расположенный на ровной поверхности, накрывался распечатанной топологией одного из слоев, вставлялись зубочистки в отверстия совмещения и начиналось проглаживание сверху прогретым до максимальной температуры утюгом вдоль центральной части. Стоит отметить необходимость придерживать лист фотобумаги при первом проглаживании и постепенное движение от центра к краям. По мере приближения к отверстиям, зубочистки снимались и углы проглаживались тщательно. Прогревалась вся площадь текстолита в

течение 2 минут. Для второй стороны процесс аналогичен. После нанесения второго слоя, горячий текстолит с бумагами помещалась в сосуд с теплой водой и оставлялась на 8 минут. Стоит обратить внимание на то что возможно из-за малого времени прогревания всей поверхности или не достаточной обработки поверхности текстолита, малые дорожки отлипли от поверхности на 6 этапе. В результате, потребовалось прорисовать удалившиеся участки дорожек нерастворимым лаком для ногтей.

## 6. Очистка от бумаги.

Бумага поверх текстолита спустя некоторое время набухла и легко удалилась механическим трением. При этом глянец удался сложней. Для удаления глянца между дорожками, текстолит доставался из воды и оставлялся для высыхания. По мере высыхания, остатки бумаги и глянца становились все более заметными, что позволило локализовать последующие механические воздействия. Далее потребовался проход острым предметом таким как зубочистка т.к. его материал не наносит повреждений на поверхность меди как это обстоит в случае с иглой, чего нельзя допустить, ибо медь в этих участках травится медленнее. В конце, для удаления остатков бумаг, текстолит промывался проточной водой.

## 7. Травление.

Готовится раствор для травления из пероксида водорода, лимонной кислоты и соли. В готовый раствор нагретый до температуры 35 – 40 °С помещается текстолит и травится в течение 30 минут до полного удаления меди из открытых участков. Для ускорения процесса, рекомендуется покачивать ванночку для помешивания раствора. После окончания процесса травления, тонер с платы смывается ацетоном.

## 8. Создание сквозных отверстий.

Переходные отверстия были изготовлены сверлом диаметром 1 мм. Стоит отметить необходимость сверления с той стороны платы на которой будут припаиваться компоненты, иначе есть риск повреждения контактных

площадок. Далее, через отверстия пронизывались металлические проводники и припаивались с двух сторон платы.

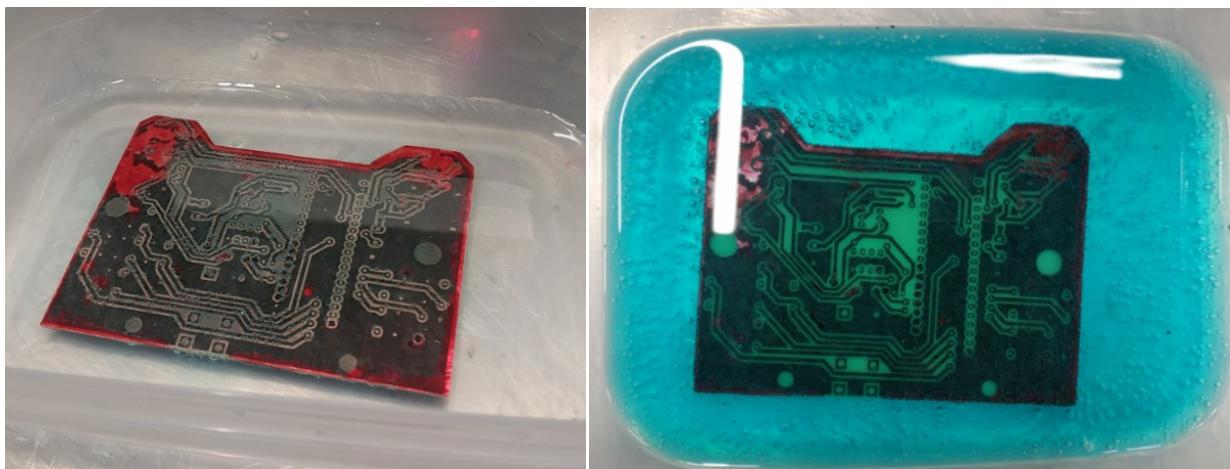


Рис. 3.14. Процесс травления. Слева начало процесса, справа – спустя 23 минуты.

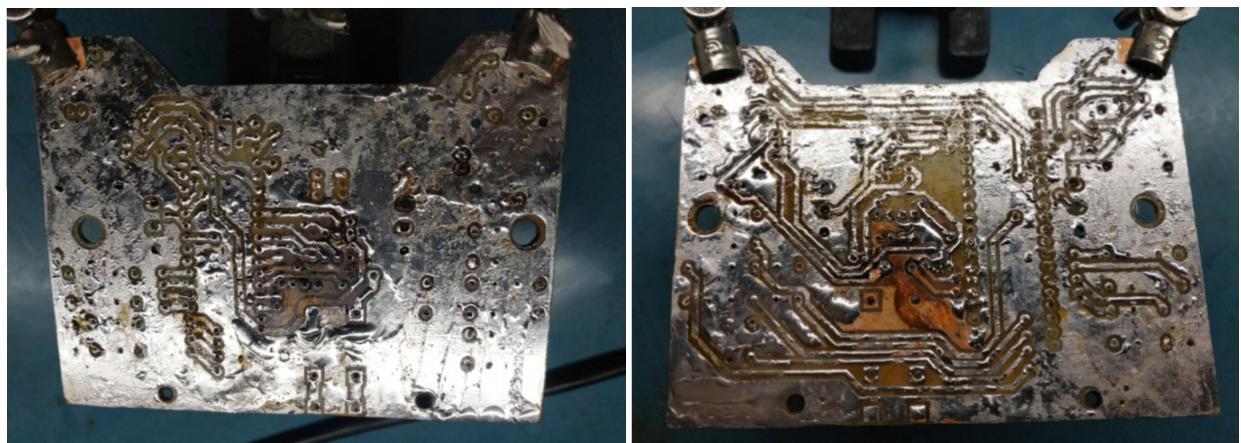


Рис. 3.15. Процесс дополнительной металлизации.

Слева верхний слой платы, справа – нижний.

## 9. Нанесение дополнительной металлизации и изоляции.

Для устранения подтрава узких дорожек и снижения их сопротивления путем увеличения толщины, проводилось покрытие дополнительной металлизацией медных областей платы посредством нанесения припоя. Данный процесс приведен на рисунках 3.14, в которых можно заметить темные и не покрытые припоеем участки платы – это места, подвергнувшиеся высокому температурному обдуву фена ( $310^{\circ}\text{C}$ ) и в следствие чего пониженнной смачиваемости металлом. Для решения данной проблемы использовалось большое количество флюса и только паяльное устройство. Также, с целью снижения паразитных взаимо воздействий близ расположенных сигнальных линий и тока утечки между дорожками

питания и полигоном земли, протестированная плата была покрыта электроизоляционным лаком.

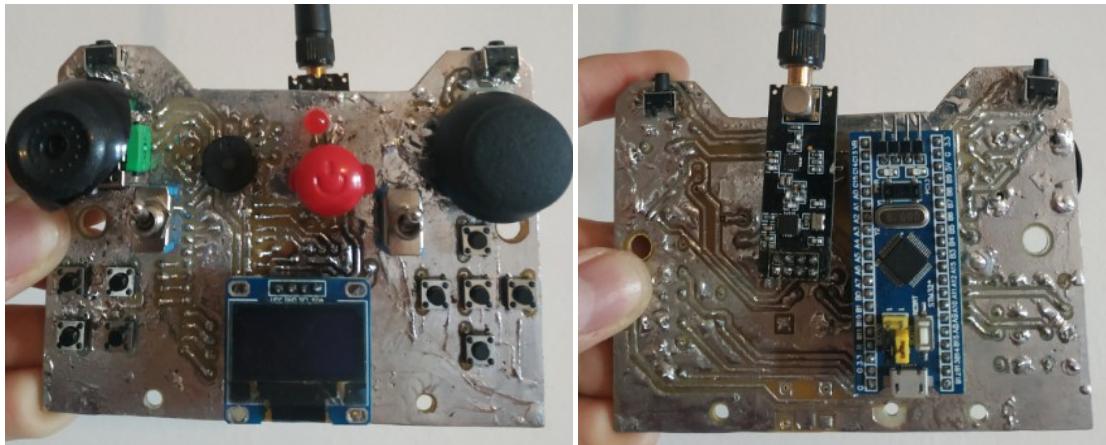


Рис. 3.16. Готовая аппаратная часть пульта управления.

Слева представлен вид спереди, справа – сзади.

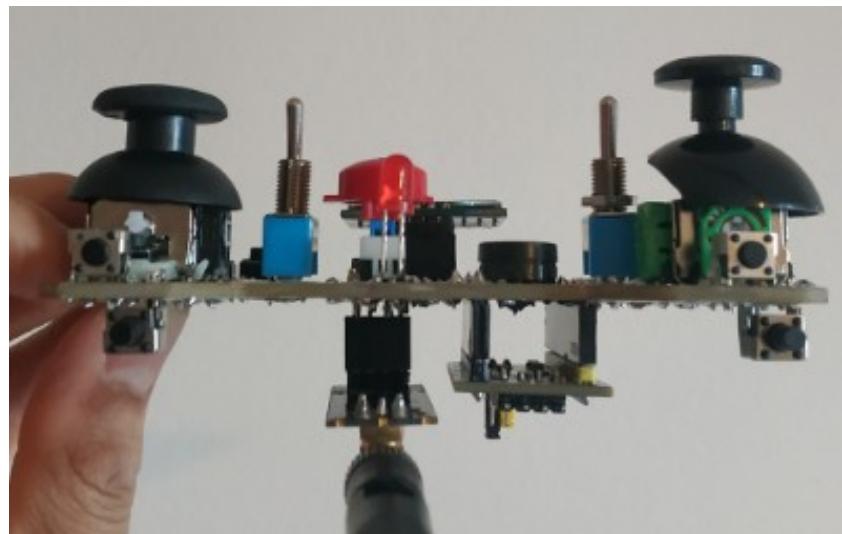


Рис. 3.17. Готовая аппаратная часть пульта управления. Вид сверху.

### 3.3. Манипулятор

- **Архитектура.**

Структурная схема устройства приведена на рисунке 3.18.

- **Моделирование.**

- о Принципиальная электрическая схема разработанной аппаратной части представлена на рисунке 3.19.
- о Также, как и при проектировании печатной платы пульта управления, все высоковольтные силовые дорожки были размещены на верхнем слое платы в то время как сигнальные линии расположены на нижнем слое. В результате, удалось получить толщину линий питания 2 мм при

компактных размерах конечной платы 54x91 мм. Топология схемы представлена на рисунках 3.20 и 3.21.



Рис. 3.18. Структурная схема манипулятора.

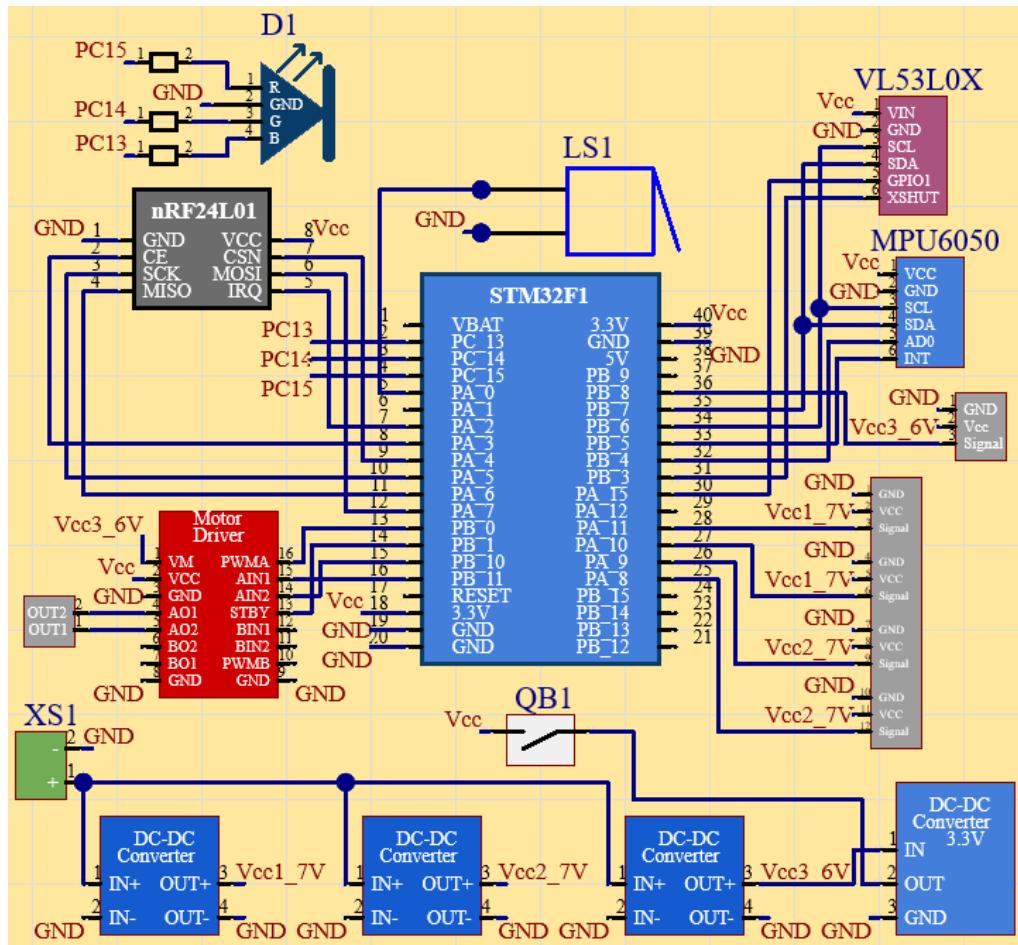


Рис. 3.19. Принципиальная электрическая схема манипулятора.

Стрелками указаны потоки данных.

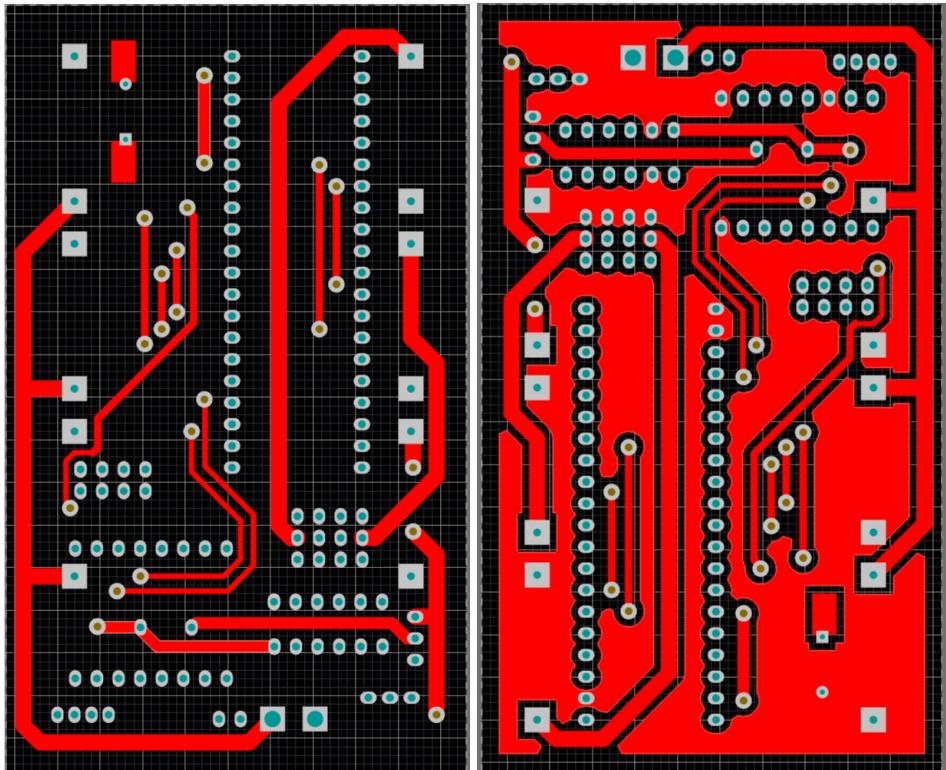


Рис. 3.20. Верхний слой топологии печатной платы манипулятора.

Слева четко видны несколько сигнальных дорожек толщиной 0,75 мм и 2 мм линий питания, справа – слой с полигоном земли.

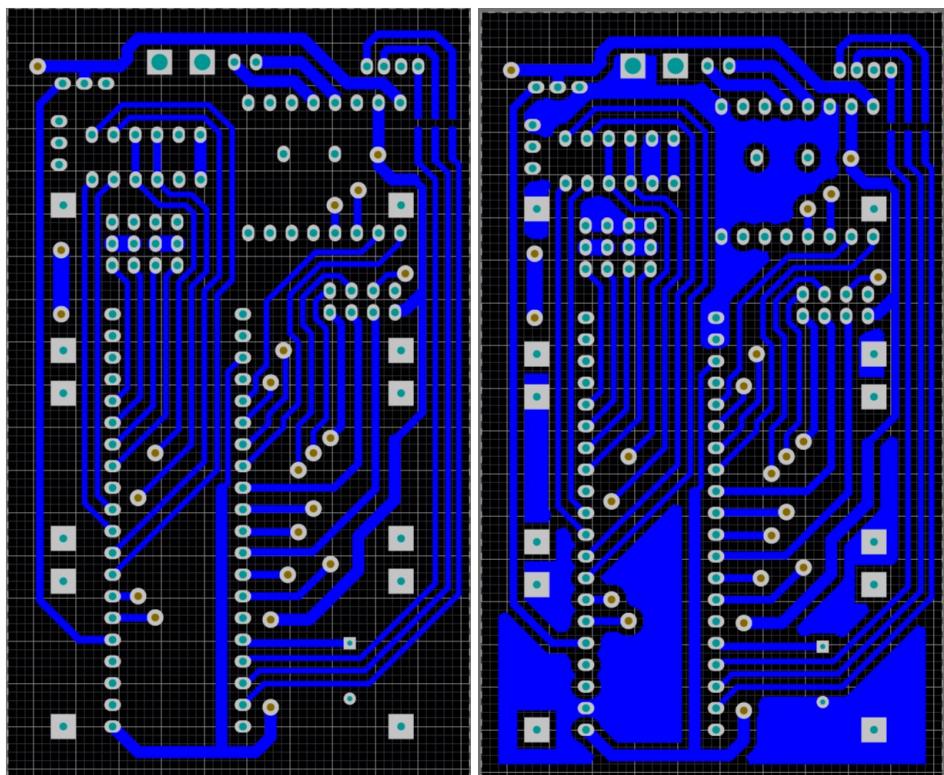


Рис. 3.21. Нижний слой топологии печатной платы манипулятора.

Слева видны множество сигнальных дорожек толщиной 0,75 мм и несколько 1,5 мм линий 3,3В, справа – слой с полигоном земли.

## • Изготовление.

Печатная плата манипулятора были изготовлена по технологии фотолитографии с использованием фотополимерного 3D-принтера [46].

Необходимые материалы:

- о Кусок двухстороннего текстолита размером 54x91x1 мм;
- о Фоторезист (ПФ-ВЩ-50 [47] и Ordyl Alpha 350 [48]);
- о Раствор для экспонирования:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (2 г);
- о Раствор для травления:  $\text{H}_2\text{O}_2$  (3%, 150 мл), лимонная кислота (30 г),  $\text{NaCl}$  (5 г);
- о Фотополимерный 3D-принтер Anycubic Photon S;
- о Ламинатор Гелеос ЛМ А4-2Р [49];
- о Ёмкость для травления, кисточка, зубочистка, ацетон;
- о Металлические проводники диаметром 1 мм, припой, электроизоляционный лак.

Перед тем как описать этапы производства, стоит сказать несколько слов о характеристиках фотополимерного принтера, фоторезистов и ламинатора.

- Фотополимерный принтер Anycubic Photon S:
  - Источник света: УФ с длиной волны 405 нм;
  - Разрешение: 47 мкм (2560x1440).
- Фоторезист сухой пленочный ПФ-ВЩ-50:
  - Тип: негативный, фототропный (разные оптические плотности до и после экспонирования);
  - Производится по ГОСТ ТУ 6-43-1568-93;
  - Толщина: 50 мкм;



Рис. 3.22. Фотополимерный 3D-принтер Anycubic Photon S

- Экспонированный фоторезист обладает высокой гальванистойкостью что позволяет качественно осаждать слои металла из электролита с pH < 7;
- Химическая стойкость фоторезиста после экспонирования обеспечивает возможность обработки в растворах с pH ≤ 10 при температуре +18°C – +25°C в течение 1 минуты и более;
- Нанесение: наклеить на плату, прогреть феном до температуры 70°C и далее поместить под пресс 2 – 5 кг/см<sup>2</sup> на 2 – 3 часа; ламинарирование;
- Время экспонирования (эффективное) от источника ДРТГ-3000 (320–420 нм): ≤ 35 сек;
- Разрешение: 120 мкм;
- Проявление: 1 – 2% водный раствор Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> при температуре +18°C – +28°C;
- Удаление (40 – 60°C): 5 – 20% водный раствор KOH или NaOH, 3 – 5% NH<sub>4</sub>OH.
- Фоторезист сухой пленочный Ordyl Alpha 350:
  - Тип: негативный, фототропный (разные оптические плотности до и после экспонирования);
  - Толщина: 50 мкм;
  - Обладает очень высокой гальванистойкостью в ваннах золочения и никелирования;
  - Устойчив к кислому и щелочному травлению;
  - Использование: кислое и щелочное травление; гальванические покрытия никель/золото, олово/свинец, медь – олово; тентинг;
  - Нанесение: ламинарирование при температуре 105 – 125°C и скорости 1 – 3 м/мин;
  - Экспонирование: УФ 360 – 380 нм;
  - Разрешение: 50 мкм при 80 – 100 мДж/см<sup>2</sup> (8 Solid Step SST21);

- Проявление (75 сек):  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с концентрацией 0,8 – 1,2% при температуре 26 – 32°C;  $\text{K}_2\text{CO}_3$  с концентрацией 0,6 – 1,0% при температуре 26 – 30°C;
- Удаление: 1,0 – 3,0% водный раствор KOH или NaOH при температуре 40 – 60°C в течение 80 – 150 сек.

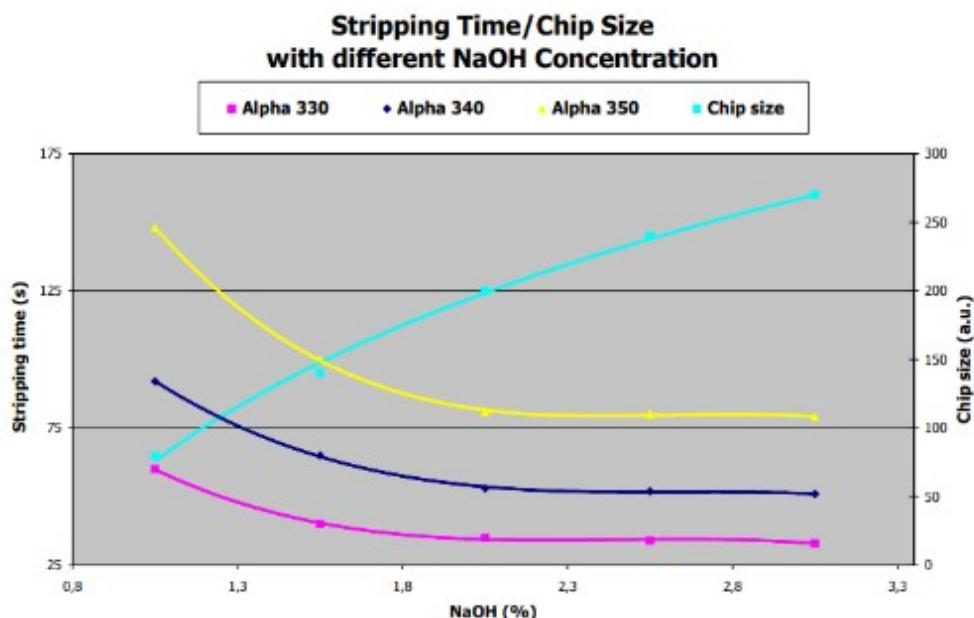


Рис. 3.23. График зависимости времени удаления фоторезиста Ordyl Alpha 350 и размера микросхем от концентрации раствора NaOH [48].

- Ламинатор Гелеос ЛМ А4-2Р:
  - Температура на валах: 120 - 135°C;
  - Скорость: 0,3 м/мин;
  - Толщина ламинации (макс): 0,6 мм;

Этапы изготовления платы:

### 1. Подготовка негативных фотошаблонов [51].

Данный этап явился самым энергозатратным в силу новизны для разработчика и особенностей САПР. Поэтому рассмотрим более подробно каждый шаг.

Шаг 1. Рамка совмещения.

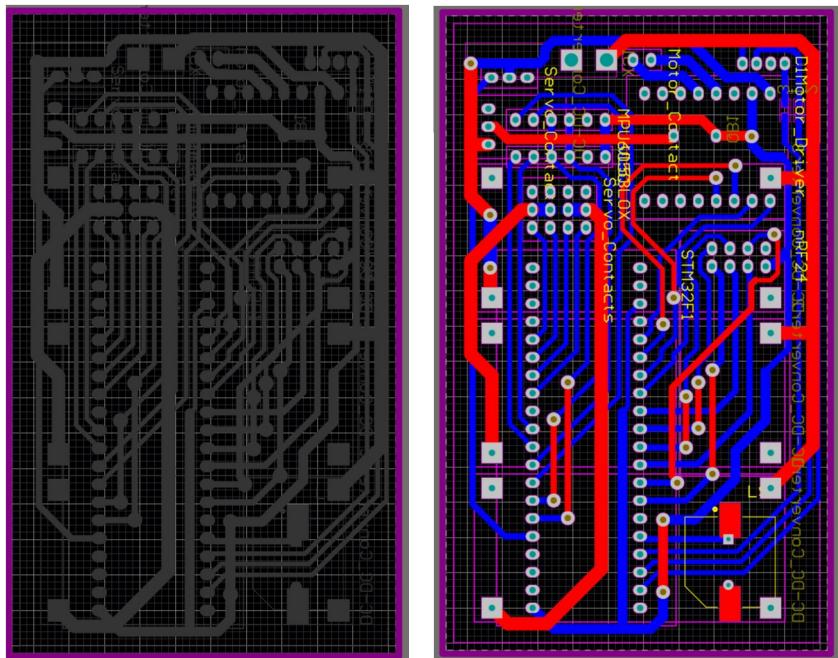


Рис. 3.24. Слева представлен механический слой топологии печатной платы манипулятора с фиолетовой рамкой совмещения, справа – вся топология без полигонов земли внутри рамки совмещения.

С целью совмещения верхней и нижней слоев топологии была создана рамка толщиной 1 мм вокруг физических границ платы на отдельном механическом слое в процессе 3D-проектирования.

### Шаг 2. Gerber файлы.

Интересующие слои топологии (верхний, нижний и механический с рамкой совмещения) экспорттировались в Gerber файлы (файлы с описанием проекта печатной платы для изготовления фотошаблонов) с помощью команд “File → Fabrication Outputs → Gerber Files”, а также места сквозных отверстий посредством “File → Fabrication Outputs → Drill Drawings”. В итоге получились отдельные слои топологии, представленные на рисунке 3.25.

### Шаг 3. «Составные» слои.

Из получившихся Gerber файлов создавались «составные» слои путем выполнения «Edit → Composite Layers → Build Composite...». В появившемся окне для первого «составного» слоя добавлялись слои с указанием поляризации (рис. 3.26): верхний (Dark), механический (Dark) и

с

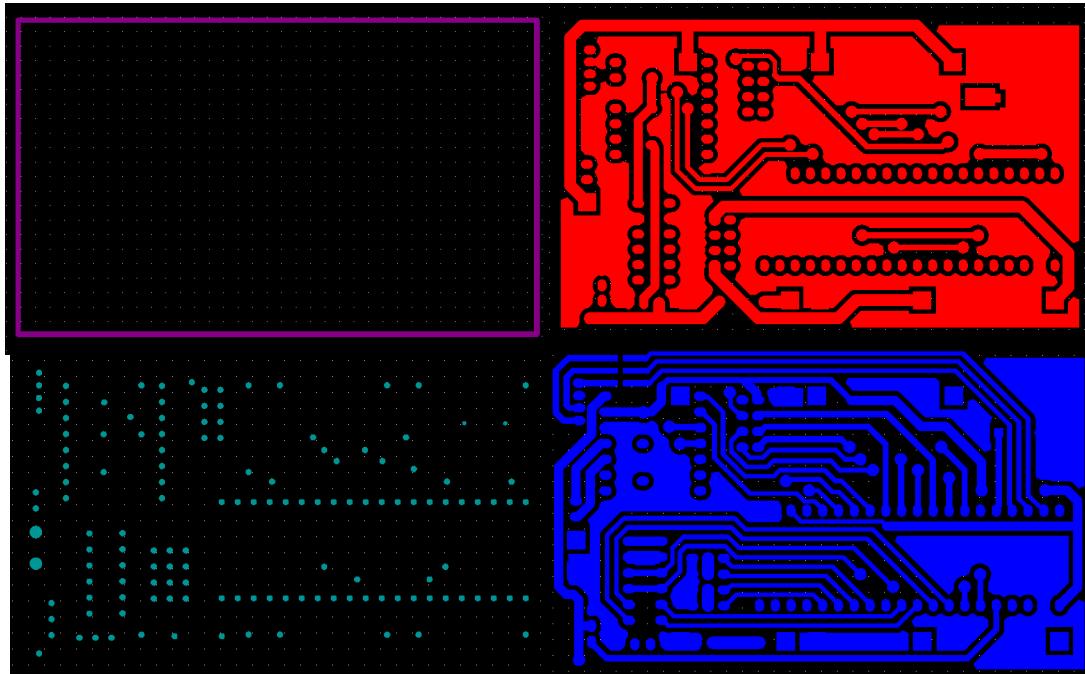


Рис. 3.25. С верхнего левого рисунка по часовой стрелке представлены слои: механический с рамкой совмещения, верхний, нижний, со сквозными отверстиями.

отверстиями (Clear). Для второго слоя процесс аналогичен: нижний (Dark), механический (Dark) и с отверстиями (Clear). В результате, получились позитивные фотошаблоны верхнего и нижнего слоев платы, приведенные на рисунке 3.27.

### Шаг 3. Негативные фотошаблоны.

Из созданных на предыдущем шаге «составных» слоев, или же позитивных фотошаблонов, сформировывались негативные фотошаблоны путем выполнения команд «Tools → Film Wizard». В появившемся окне выставлялись в целых дюймах размеры платы больше чем актуальные, и нажатием «Neg./Mirror...» выбирались слои для создания негативных и/или отзеркаленных вариантов. Стоит помнить, что один из фотошаблонов создается в отзеркаленном формате (в частности, в данной работе - верхний) и другой в оригиналe. Результаты приведены на рисунке 3.28. Получившиеся негативные «составные» слои экспорттировались в отдельные Gerber-файлы (ставится галочка в поле «Separate Composite layers to individual Files») в формате RS-274-X.

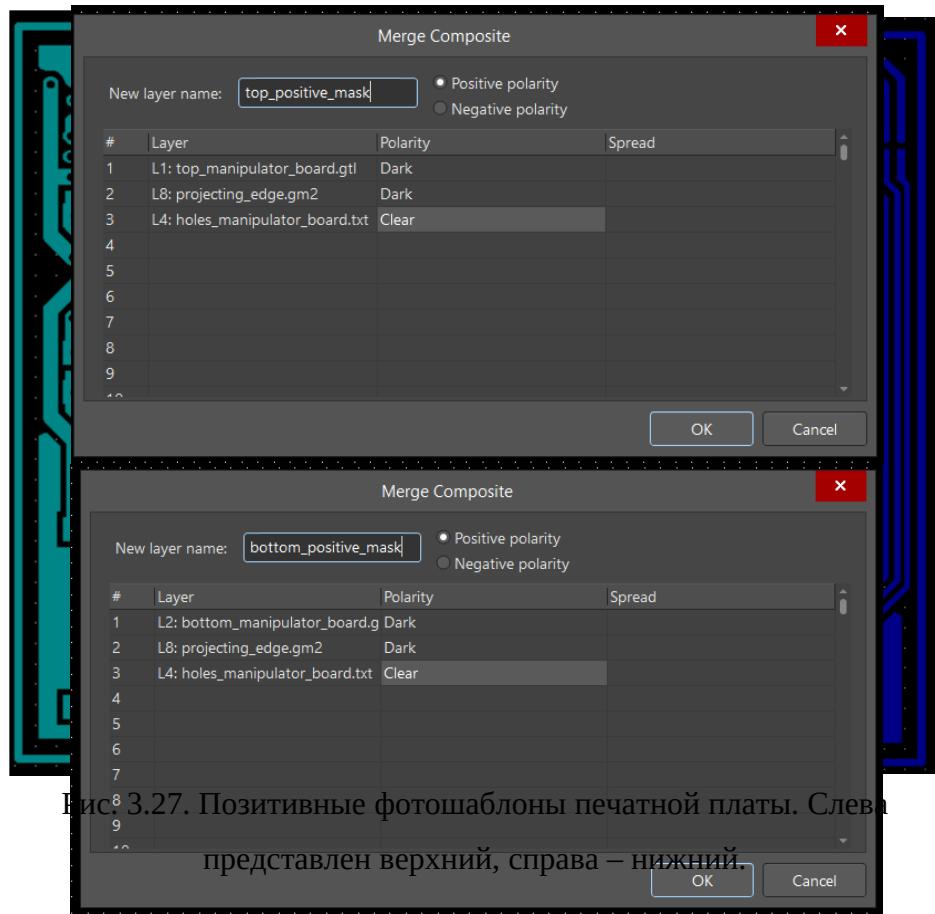


Рис. 3.27. Позитивные фотошаблоны печатной платы. Слева – верхний, справа – нижний.

Рис. 3.26. Создание «составных» слоев. Сверху верхний позитивный слой, снизу – нижний.

#### Шаг 4. Векторный формат Gerber-файлов.

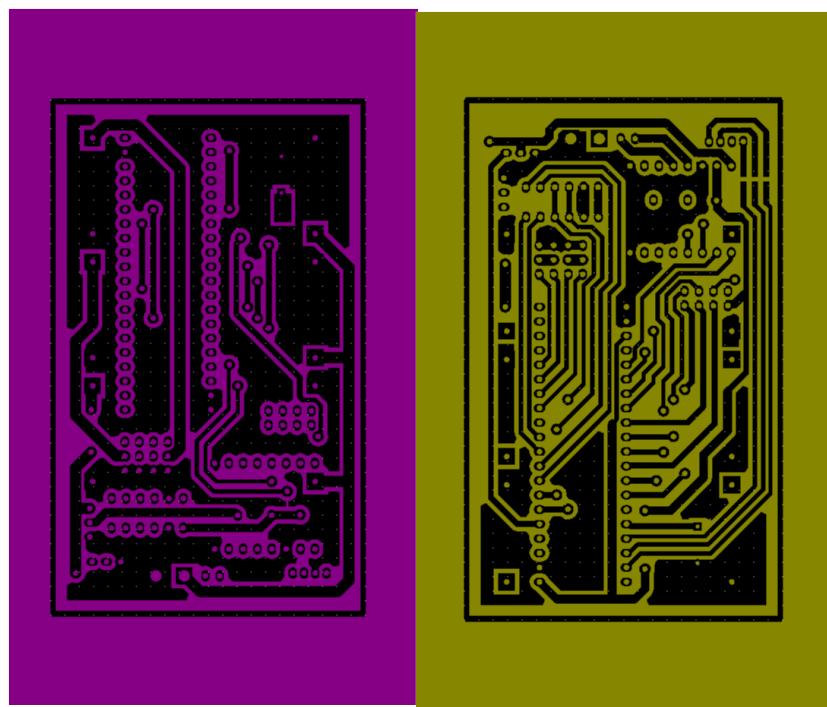


Рис. 3.28. Негативные фотошаблоны печатной платы. Слева представлен верхний, справа – нижний.

Для создания конечного фотошаблона, интерпретируемого фотополимерным принтером, было необходимо создание файлов с векторной графикой расширения SVG. Для этой цели использовалась утилита Gerbv (gEDA's Gerber Viewer) [52]. Gerber-файлы экспорт天涯ные на предыдущем шаге открывались в утилите с помощью команд «File → Open layer(s)...», а затем выставлялись в определенном порядке приоритета. Иначе при формировании в векторное расширение возможно потеря участков топологии из-за наложения одних слоев поверх других. Полученный фотошаблон экспорт天涯лся в SVG файл.

#### Шаг 5. Файл с расширением дисплея принтера.

Для создания фотошаблона топологии с расширением дисплея фотополимерного 3D-принтера (1440x2560) использовалась утилита Inkscape [53] для работы с файлами векторного формата. Экспортируем файл в формате PNG.

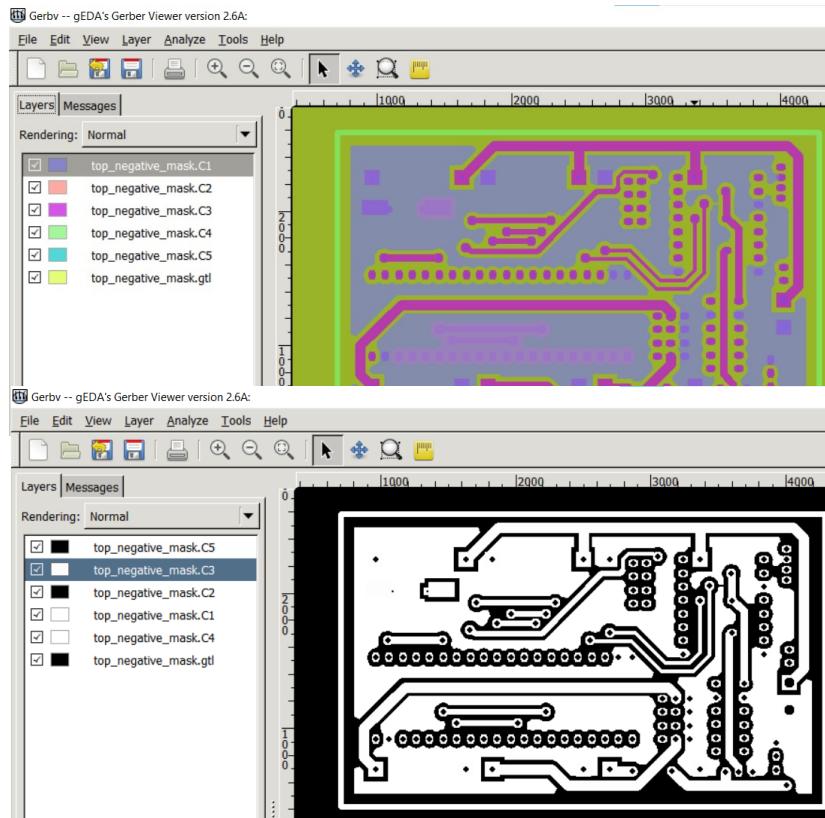


Рис. 3.29. Создание векторного формата фотошаблонов из Gerber-файлов.  
Правильная последовательность (снизу-вверх): подложка, рамка совмещения,  
сигнальный слой, слой отверстий.

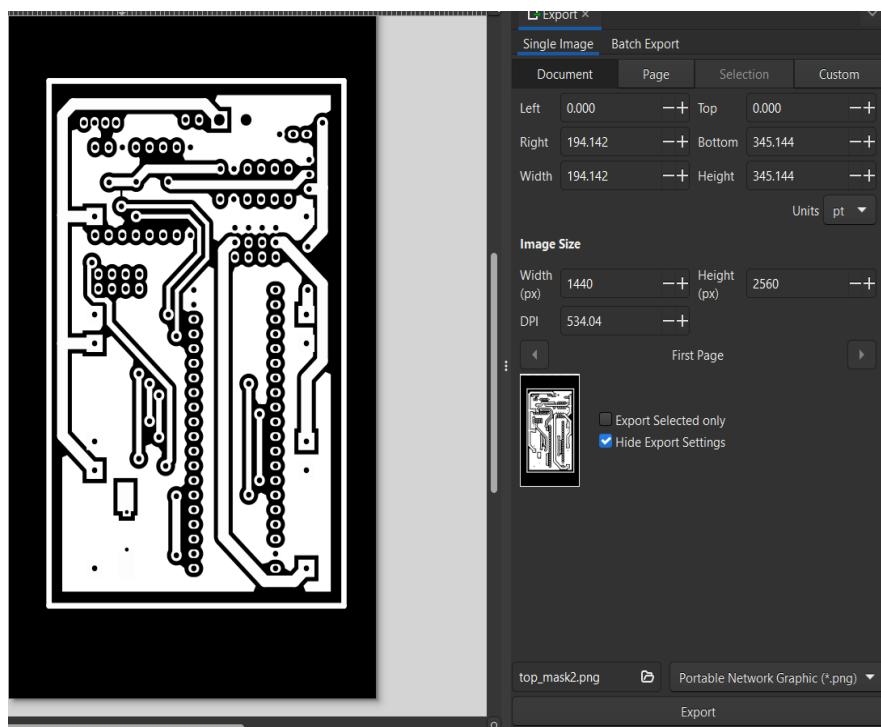


Рис. 3.30. Редактирование фотошаблона векторного формата в Inkscape, с  
сохранением в формате PNG и расширением дисплея 3D-принтера  
(1440x2560).

## Шаг 6. Photon-файлы.

Для изменения формата фотошаблона из PNG в формат 3D-принтера (.photon) использовалась утилита UVtools [54].

## Шаг 7. Параметры экспонирования.

Для задания времени экспонирования фоторезиста на 3D-принтере, что является временем засветки одного слоя печати, использовалась официальное приложение Photon Workshop от Anycubic [55]. Процесс настройки параметров экспонирования фоторезиста приведен на рисунке 3.31.

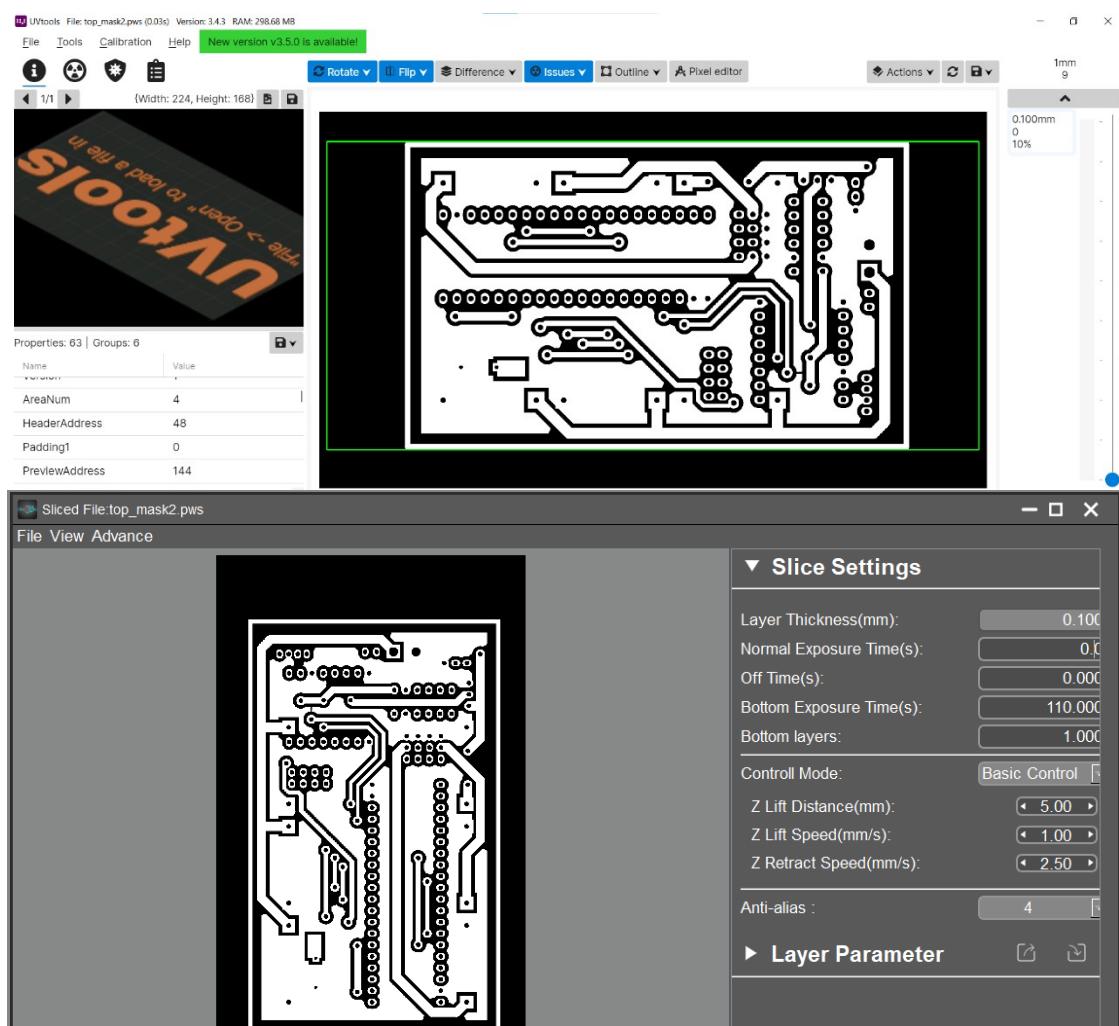


Рис. 3.31. Сверху представлено экспортование PNG файла фотошаблона верхнего слоя в расширение photon 3D-принтера в утилите UVtools, снизу – настройка времени экспонирования (110 сек) в приложении Photon Workshop.

## 2. Обработка текстолита.

Текстолит подвергся удалению от грязи, промыванию чистой водой и сушке бумажным полотенцем. Шлифование для данной технологии не допустимо, т.к. в противном случае теряются адгезивные свойства фоторезиста.

## 3. Нанесение фоторезиста и сушка.

Было проведено изготовление с двумя фоторезистами, наилучший результат получился с Ordyl Alpha 350. С куска фоторезиста в размере на 10 мм больше чем размеры текстолита снималась матовая защитная пленка с одной стороны, а глянцевая пленка оставалась до этапа проявления. Для случая с Ordyl Alpha 350, фоторезист прикладывался к краю текстолита, и вся заготовка пропускалась через ламинатор дважды. Для нанесения фоторезиста ПФ-ВЩ-50 было необходимо заранее нагреть и поддерживать текстолит при температуре 90 – 110°C в течение всего процесса нанесения. Также, как и в предыдущем случае фоторезист прикладывался к краю текстолита и затем пластиковой картой медленно без допущения пузырей наносился по всей площади. Данный процесс приведен на рисунке 3.32.

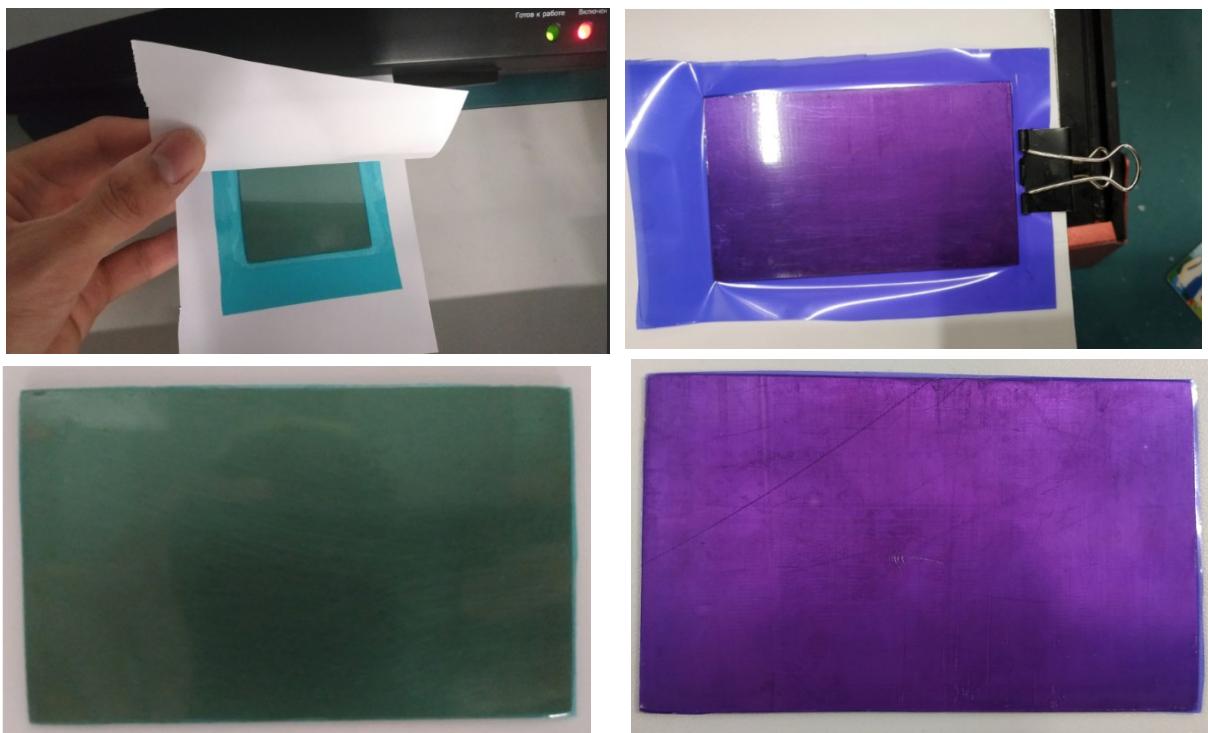


Рис. 3.32. Нанесение фоторезиста . Сверху представлен сам процесс, снизу - после удаления лишнего фоторезиста. Слева фоторезист Ordyl Alpha 350, справа – ПФ-ВЩ-50.



#### 4. Совмещение и экспонирование.

Запускалась засветка фотошаблона на дисплее 3D-принтера и в течение 5-7 сек размещался текстолит внутри рамки совмещения. Затем засветка останавливалась и начиналась заново без изменения положения заготовки. Время экспонирования фоторезиста Ordyl Alpha 350 составил 110 сек, ПФ-ВЩ-50 – 420 сек. Процесс экспонирования представлен на рисунке 3.33.

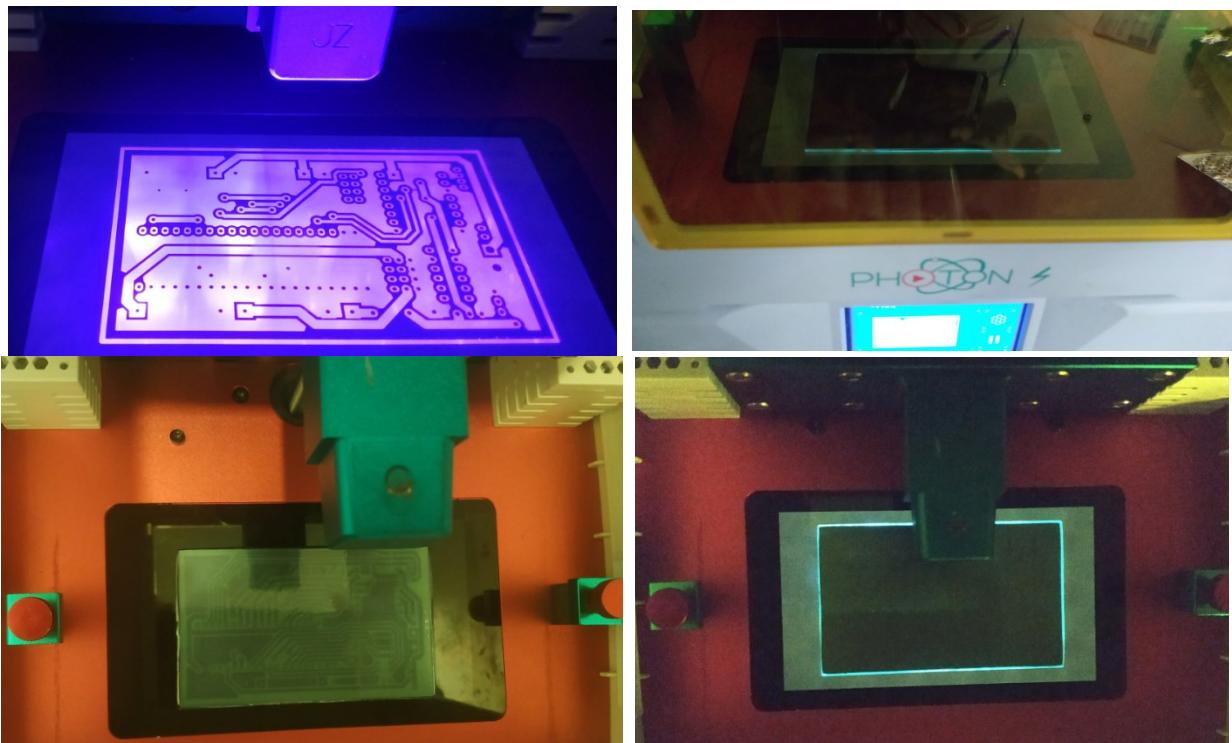


Рис. 3.33. Совмещение и экспонирование фоторезиста . С верхнего левого рисунка по часовой стрелке представлены: фотошаблон; засветка (вид сбоку); засветка (вид сверху); изменение оптической плотности фоторезиста после засветки

#### 5. Проявление.

Для проявления фоторезиста использовался 1% водный раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Время проявления фоторезиста ПФ-ВЩ-50 2 мин при температуре  $37^\circ\text{C}$  (в ультразвуковой ванне), фоторезиста Ordyl Alpha 350 – 24,4 мин и 30-32 $^\circ\text{C}$  соответственно. Процесс проявления приведен на рисунке 3.34.

#### 6. Задубливание.

Для увеличения стойкости проявленного фоторезиста к последующему этапу травления было проведено его задубливание при температуре  $150^\circ\text{C}$  в течение 2 мин (по 1 мин с каждой стороны платы). Процесс задубливания фоторезиста Ordyl Alpha 350 представлен на рисунке 3.34.

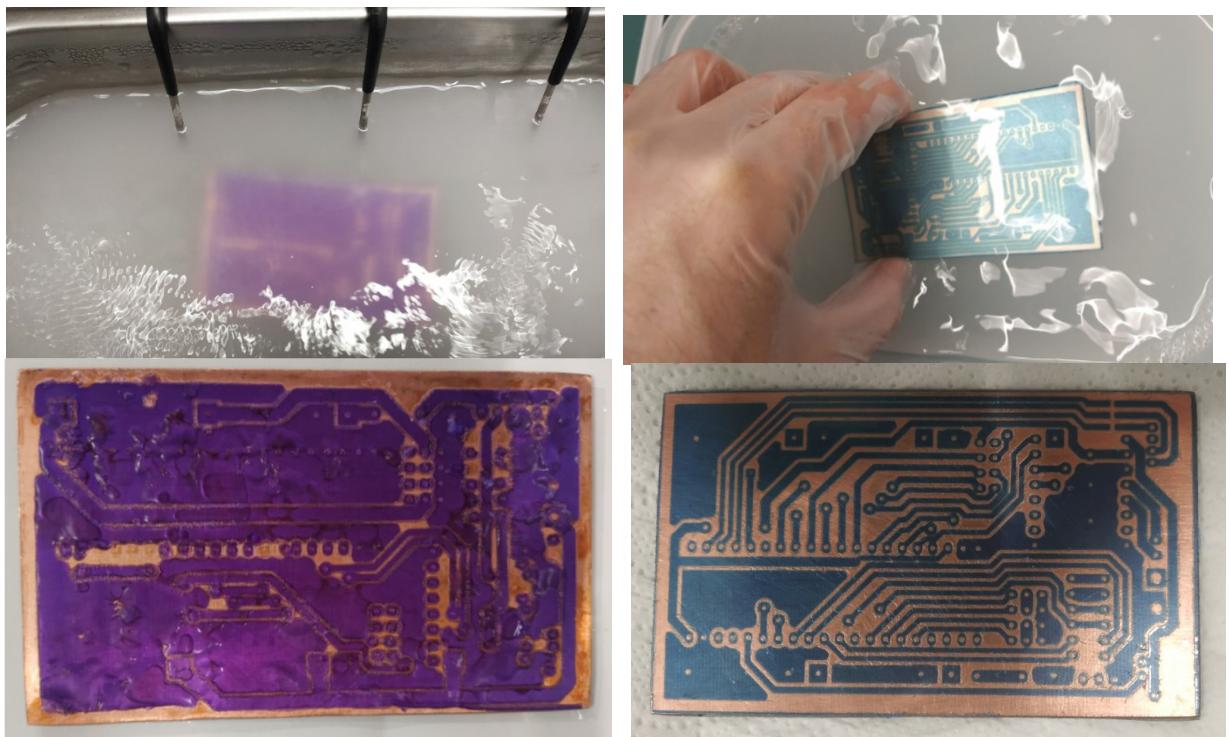


Рис. 3.34. Проявление фоторезиста . Слева представлен фоторезист ПФ-ВЩ-50 в ультразвуковой ванне (сверху) и его перепрояв (снизу), слева – Ordyl Alpha 350

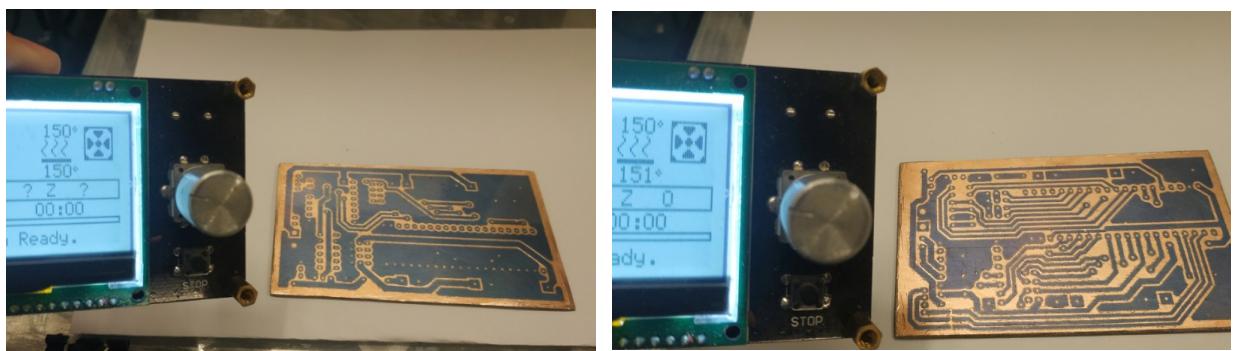


Рис. 3.35. Задубливание фоторезиста Ordyl Alpha 350. Слева представлен верхний слой топологии, справа – нижний.

## 7. Контроль.

Места не до проява корректируются путем механического удаления зубочисткой.

## 8. Травление.

Для травления фоторезиста использовался раствор из: 3% пероксида водорода (150 мл), лимонной кислоты (30 г) и хлорида натрия (5 г). Время и температура травления фоторезиста Ordyl Alpha 350: 50 мин и 30-32°C. Процесс травления представлен на рисунке 3.36.



Рис. 3.36. Травление фоторезиста . С левого верхнего рисунка по часовой стрелке представлены: компоненты раствора травления; вид платы спустя 5 мин травления; на 37 мин травления; после процесса травления.

## 9. Удаление фоторезиста, контроль и создание сквозных отверстий.

Оставшийся фоторезист был удален с помощью ацетона, промыт в проточной воде и высушен бумажным полотенцем. Далее следовал контроль результатов процесса травления с устраниением следов не до трава механическим трением. Создание переходных отверстий на плате осуществлялся сверлом диаметра 1 мм. Данные процессы приведены на рисунке 3.37.

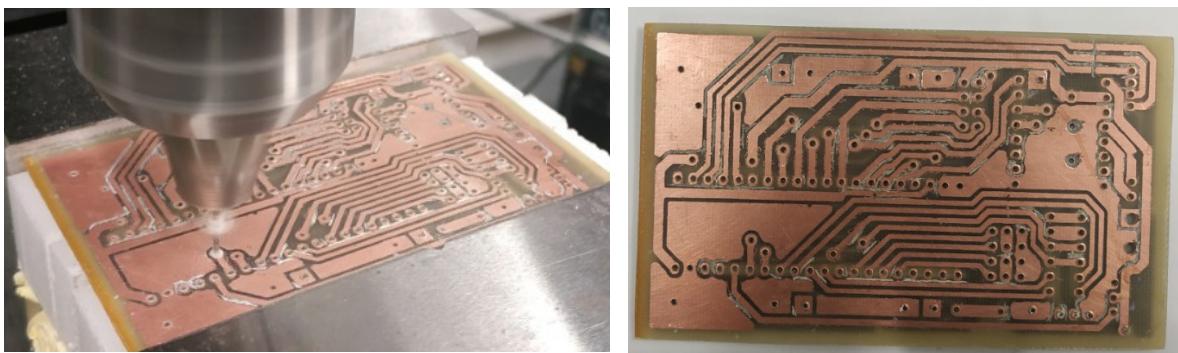


Рис. 3.37. Создание сквозных отверстий. Слева представлен сам процесс, справа – результат. Также, можно заметить следы механических воздействий в местах плотного расположения сигнальных линий.

## 10. Нанесение дополнительной металлизации и изоляции.

Для улучшения проводимости дорожек за счет увеличения их площади поперечного сечения, было нанесено небольшое количество припоя на печатную плату. Также, для увеличения изоляции близлежащих медных участков, протестированная плата была покрыта слоем электроизоляционного лака.

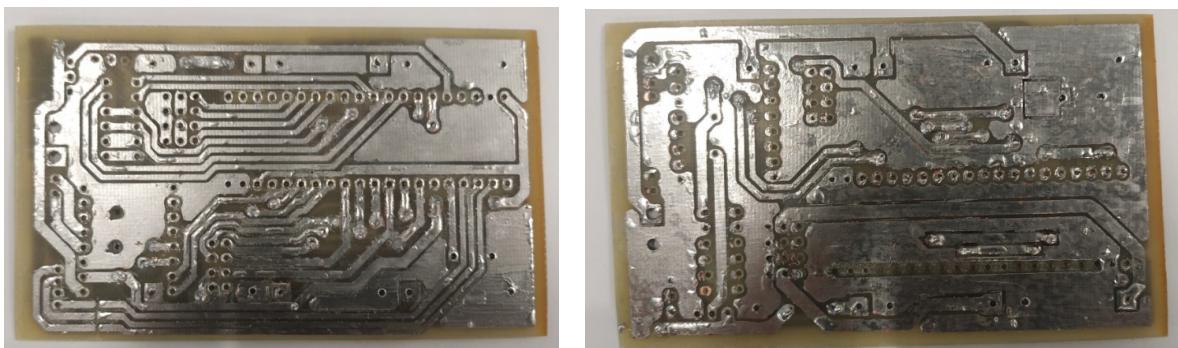


Рис. 3.38. Печатная плата, покрытая дополнительной металлизацией.

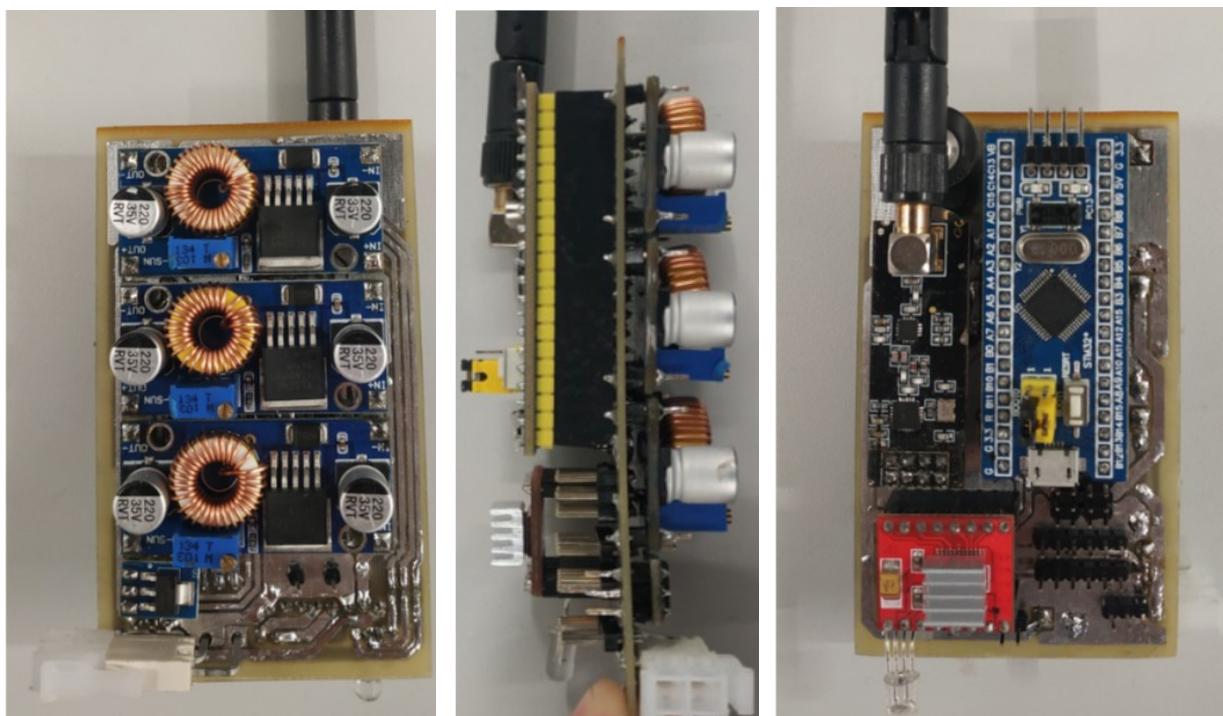


Рис. 3.39. Готовое аппаратное обеспечение манипулятора. Слева представлен вид сзади, в центре – вид сбоку, справа – вид спереди.

## **ГЛАВА 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РОБОТА**

В данной главе будет рассмотрены программные обеспечения (ПО) разрабатываемых составных частей робота, применяемые алгоритмы и используемые среды разработки.

Для описания процесса разработки ПО устройств, необходимо рассмотреть по отдельности следующие пункты:

- Аппаратная платформа, где будет реализовано ПО и которая определяет возможные языки программирования и среды разработки.
- Функциональность – набор двигательных функций и/или функций управления необходимых к реализации с помощью ПО
- Архитектура в виде блок-схемы последовательности выполняемых действий как программой, так и пользователем.

### **4.1. Пульт управления**

- Аппаратная платформа – МК STM32F103C8T6. В качестве среды разработки выступал официальный софт STM32CubeIDE от STMicroelectronics [56]. Выбор обоснован наличием множества готовых библиотек, которые используются для разработки ПО. Язык программирования: C++.
- Функциональность.
  - Управление 2 режимами работы манипулятора:
    - Режим «Играй», в котором пользователь решает каким звеном исполнительного механизма манипулятора управлять;
    - Режим «Трудись», когда траектория движения звеньев манипулятора рассчитывается программой, а пользователь задает лишь направление движения и ориентацию рабочего органа (реализация в перспективе).
  - В данном режиме предусмотрено два случая захвата объекта:

- Вертикальный, когда доступ к объекту возможен только при движении рабочего органа по вертикали (например, пластиковая бутылка в корзине);
- Горизонтальный, когда существуют ограничения на перемещение объектов по вертикали, но не по горизонтали (книга на книжной полке).

о Выбор усилия захвата, которая определяется двумя факторами:

- величиной подаваемого напряжения на мотор, или величиной крутящего момента. Регулировка подаваемого напряжения возможно, но не реализовано при данном раскладе печатной платы т.к. требует внедрения дополнительных электронных компонентов;
- местом контакта объекта и фаланг «пальцев» относительно оси поворота «пальцев», или же плечом прикладываемого усилия. Чем ближе расположен объект к оси поворота «пальцев», или другими словами насколько большая площадь объекта охвачена «пальцами», тем сильнее воспроизведен захват объекта. Данный фактор можно регулировать на программном уровне путем изменения скважности подаваемого ШИМ-сигнала на драйвер мотора. В результате, возможен выбор трех режимов усилия захвата, которые аналогичны трем реакциям животных возникающие при встрече с опасностью[57]:
  - «Хрупкий», когда скважность ШИМ-сигнала составляет 10% что обеспечивает малую скорость поворота «пальцев» и позволяет частично предотвращать нежелательные деформации при захвате объектов с хрупкими поверхностями путем моментальной остановки поворота. Устранить полностью нанесение повреждений можно с применением датчиков обратной связи (тензодатчики крутящих моментов и сил [7][8]), чего нет пока в составе рабочего органа, но есть планы внедрения в перспективе.
  - «Быстрый», при которой скважность сигнала выставляется по максимуму и поворот «пальцев» быстрый. Данный режим

- предназначен для захвата динамических объектов таких как катящиеся теннисные мячи;
- «Твердый», или «боевой», когда скорость поворота «пальцев» соответствует 55% скважности ШИМ-сигнала. В данном режиме, по сравнению с предыдущими двумя, возможен больший охват площади поверхности объекта, т.к. средняя скорость поворота позволяет прокрутить объект вокруг собственной оси (чего можно не ожидать при «быстром» захвате) и воспроизвести крепкий захват за малый промежуток времени чем при «хрупком» захвате.

о Индикация информации таких как:

- Режимы работы манипулятора, управляемое звено, режим захвата, усилие захвата;
  - Координаты рабочего органа относительно неподвижной базы (реализация в перспективе);
  - Расстояние до объекта (реализация в перспективе)
- Архитектура. Последовательность выполняемых команд и процессов программным обеспечением и/или человеком-оператором представлена в виде блок-схемы на рисунке 4.1.

Далее рассмотрим в подробности принцип работы программного кода реализованного в пульте управления тесно связанного с ПО для манипулятора. Этапы начиная со 2 выполняются в основном цикле программы.

### 1. Инициализация периферии.

После нажатия кнопки включения устройства, загорается красный LED, подается питание на МК и все периферийные устройства: OLED дисплей, модуль связи, тактовые кнопки и джойстик. В самом МК настраиваются параметры тактовых частот (в качестве источника берется внешний кварцевый резонатор с частотой 8МГц), интерфейса

обмена данными SPI с модулем связи и I<sup>2</sup>C с OLED дисплеем, а также порты ввода/вывода данных для кнопок и джойстика.

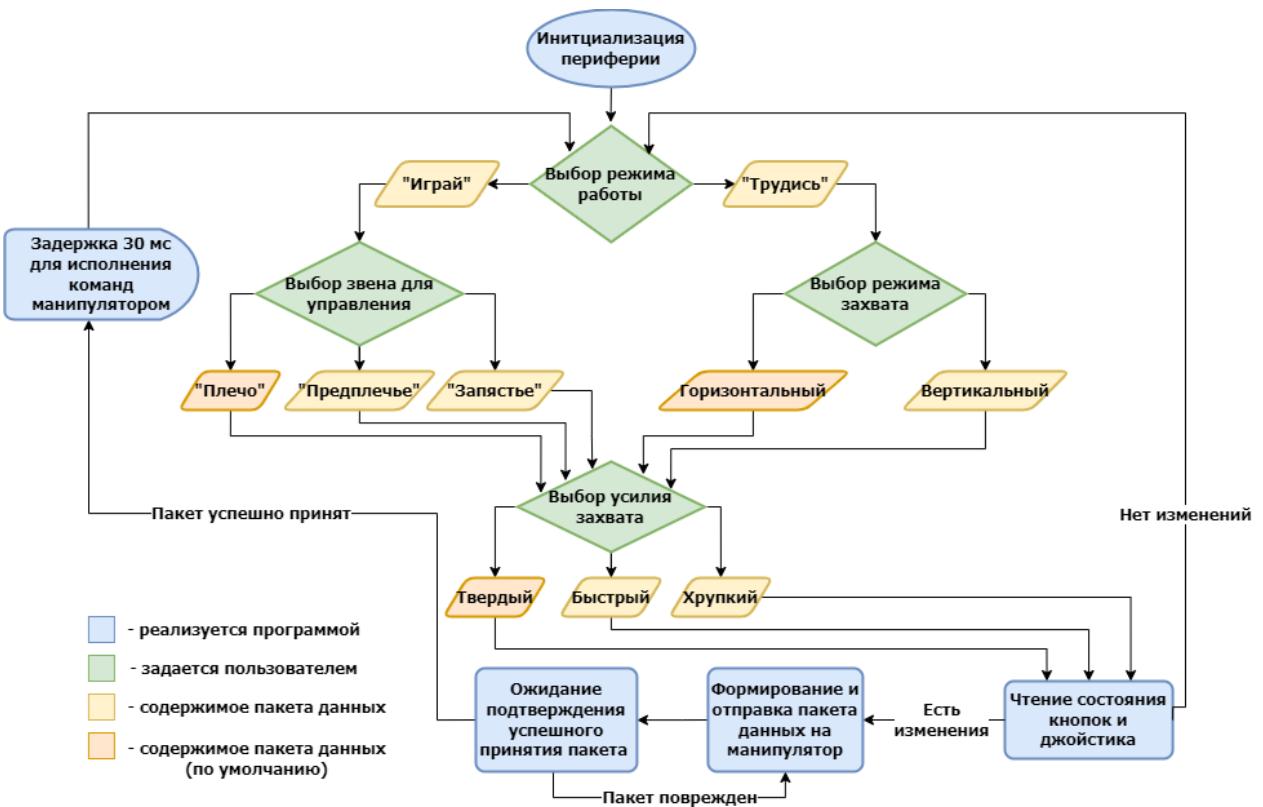


Рис. 4.1. Блок-схема алгоритма действий, выполняемых программой и/или пользователем при работе с пультом управления.

## 2. Выбор режима работы.

При первой итерации основного цикла, пользователю необходимо выбрать режим работы манипулятора с помощью переключения тумблера (верхнее положение соответствует режиму «Трудись», нижнее – «Играй») или нажатием тактовых кнопок по вертикали с последующим нажатием центральной кнопки для подтверждения выбора. Сами режимы и переключение между ними отображается на OLED дисплее и сопровождается звуковыми эффектами с динамика. Пока не произошло подтверждения режима работы остальная часть кода не выполняется. При последующих итерациях основного цикла данный этап пропускается с учетом сохраненного на предыдущей итерации режима. При изменении положения тумблера или выборе режима с помощью

кнопок на дисплее, данное изменение вступает в силу со следующей итерации.

### 3. Выбор режима захвата или звена манипулятора.

Аналогично процессу выбора режима работы манипулятора, выбор режима захвата или звена манипулятора производится на обязательной основе при первой итерации и по желанию пользователя на последующих итерациях. Единственно отличие заключается в использовании только тактовых кнопок, ибо изолирование тумблера только для выбора режима работы обосновано удобством и быстротой использования что возможно сыграет большую роль при некоторых обстоятельствах. Выбранные режима также отображаются на дисплее.

### 4. Выбор усилия захвата.

Данный этап полностью аналогичен 3 этапу. Стоит отметить лишь расположение тактовых кнопок управления направлением поворота «пальцев» (захватить и отпустить), они расположены на верхней боковой части пульта как в игровых джойстиках.

### 5. Чтение состояния кнопок и джойстиков.

Тактовые кнопки и джойстик являются устройствами управления положения рабочего органа и исполнительного механизма манипулятора. В основном цикле программы, при каждой итерации эти устройства опрашиваются однократно по порядку, представленному на рисунке 4.2. При обнаружении хотя бы одного изменения состояния любого из этих устройств, данные сохраняются в массиве специально выделенного для пакета данных отправляемых модулем связи на второй МК расположенный в базе манипулятора. Если нет изменений в состояниях, то основной цикл на этом завершается. Также, учитывались

возможные шумовые воздействия на сигнальные входы МК (аппаратно реализовано в виде TTL триггера Шмитта) и погрешности в положении джойстика (отклонения начиная от 6% максимальной величины в начальном положении джойстика регистрируются, по 5% - не учитываются).

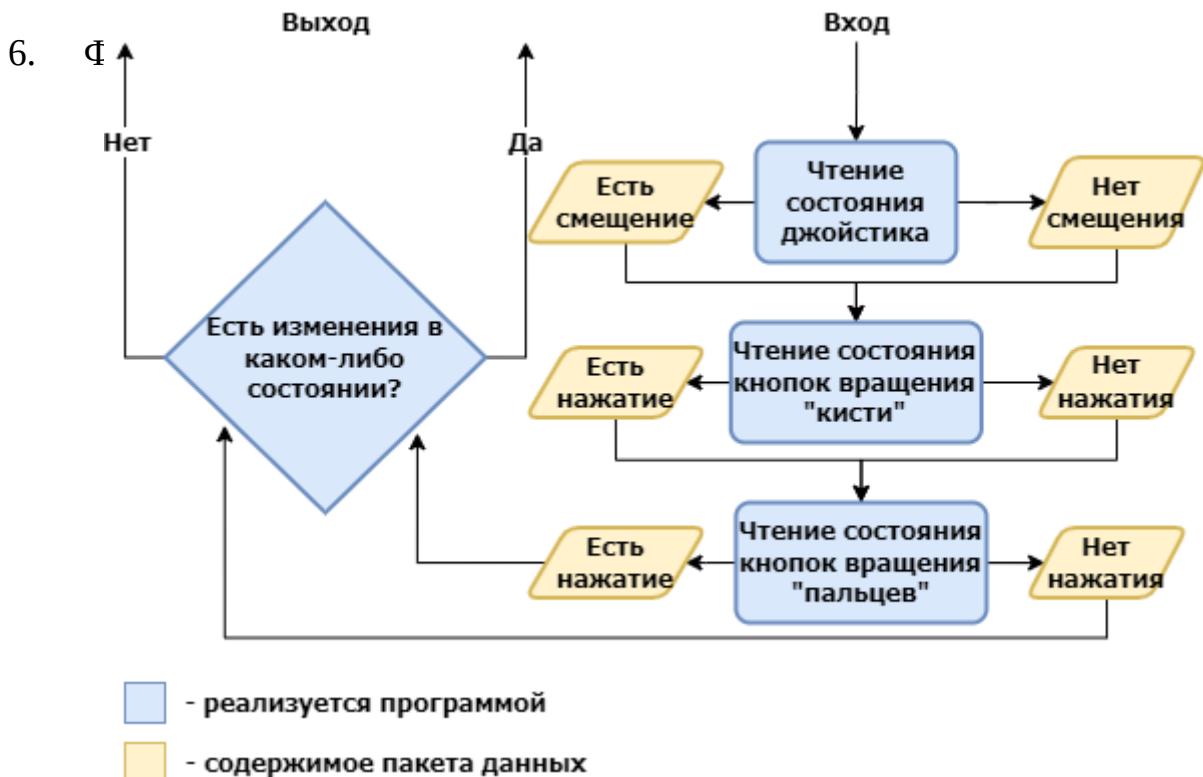


Рис. 4.2. Блок-схема последовательности опроса устройств в составе пульта управления, задающих положения рабочего органа и исполнительного механизма манипулятора.

При регистрации хотя бы одного изменения в состояниях кнопок и/или джойстика на предыдущем этапе, осуществляется переход на данный этап в котором формируется пакет данных состоящий из:

- Режимов работы робота, управляемое звено или режим захвата, усилие захвата;
- Состояния кнопок и смещения джойстика по двум осям.

Как только сформирован пакет, модуль связи вызывается из режима низкого энергопотребления Power Down для отправки посылки.

Аппаратно реализовано отправка запроса на подтверждение получения пакета на приемнике. Если пакет получен приемником и количество

байтов (полезных данных) проверено на равенство определенному числу, то отправляется обратно подтверждение об успешном получении. Иначе, если пакет не получен или поврежден, то передатчик повторяет посылку. Время между повторными посылками 4 мсек и число повторений 5. После успешной отправки, модуль связи обратно возвращается в режим Power Down.

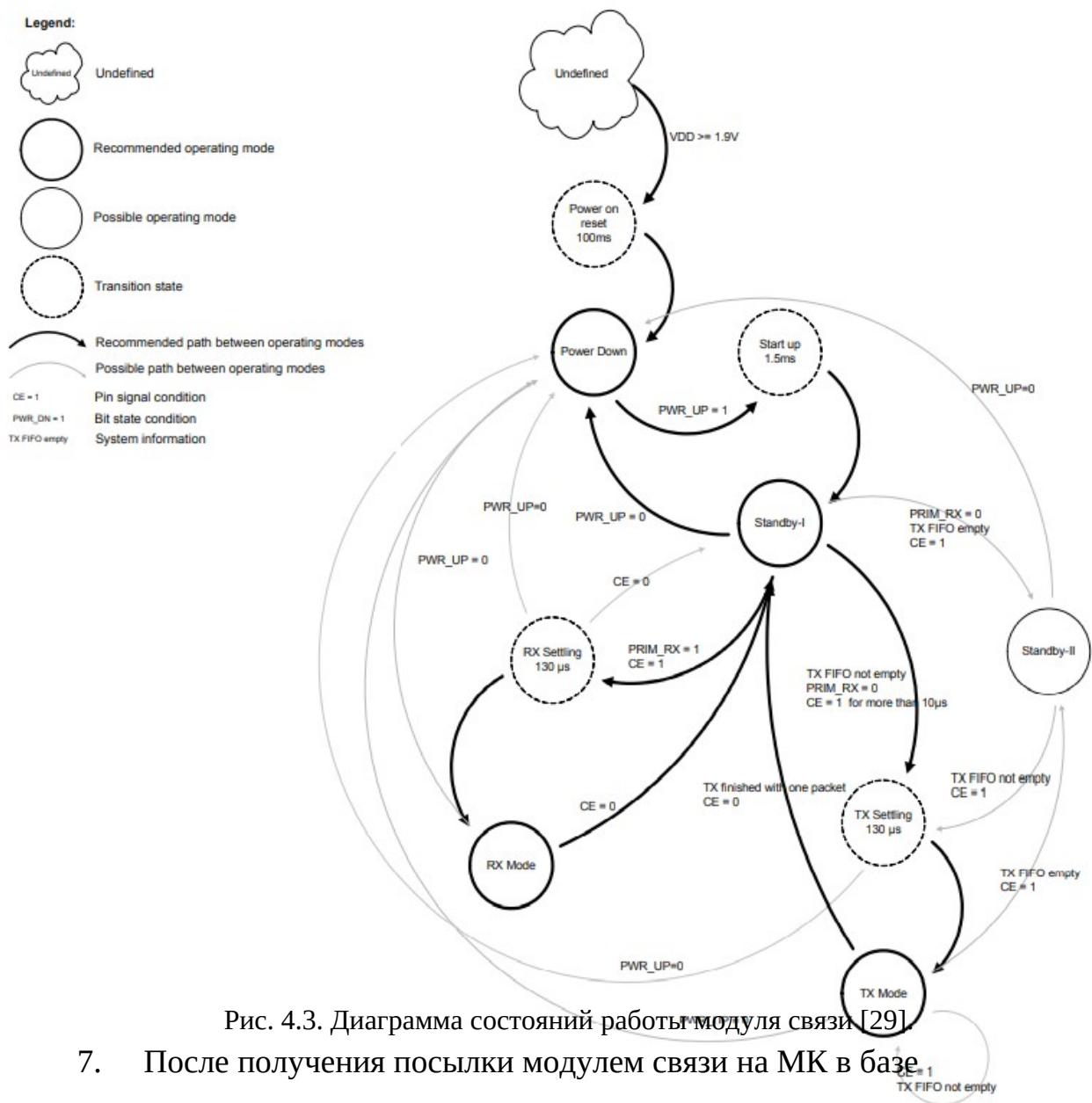


Рис. 4.3. Диаграмма состояний работы модуля связи [29]

7. После получения посылки модулем связи на МК в базе манипулятора, пакет распаковывается и требуемые действия

совершаются рабочим органом и/или исполнительным механизмом, в частности задаются:

- Углы поворота сервоприводов в сочленениях исполнительного механизма;
- Направление и скорость поворота «пальцев» в рабочем органе

Реализована задержка на 30 мсек после получения подтверждения успешной получения пакета и перед началом следующей итерации основного цикла программы в пульте управления.

## 4.2. Манипулятор

- Аппаратная платформа.

Как уже было сказано в главе 3, была создана единая электронно-компонентная база для унификации и взаимозаменяемости.

Следовательно, язык и среда разработки те же что и для пульта управления.

- Функциональность также не отличается, за исключением отсутствия возможности отобразить графическую или текстовую информацию. Но существует RGB светодиод, указывающий на состояние аппаратного обеспечения: красный цвет горит при наличии питания платы, желтый – при успешном получении данных и последующей обработки команд.
- Архитектура. Принцип работы программного кода, реализованного на манипуляторе представлен на рисунке 4.4.

В силу тесной связи разработанных ПО для пульта управления и манипулятора, блок-схема последнего устройства не нуждается в подробном описании и может быть найдена в рассмотренных ранее алгоритмах работы программного кода пульта управления.

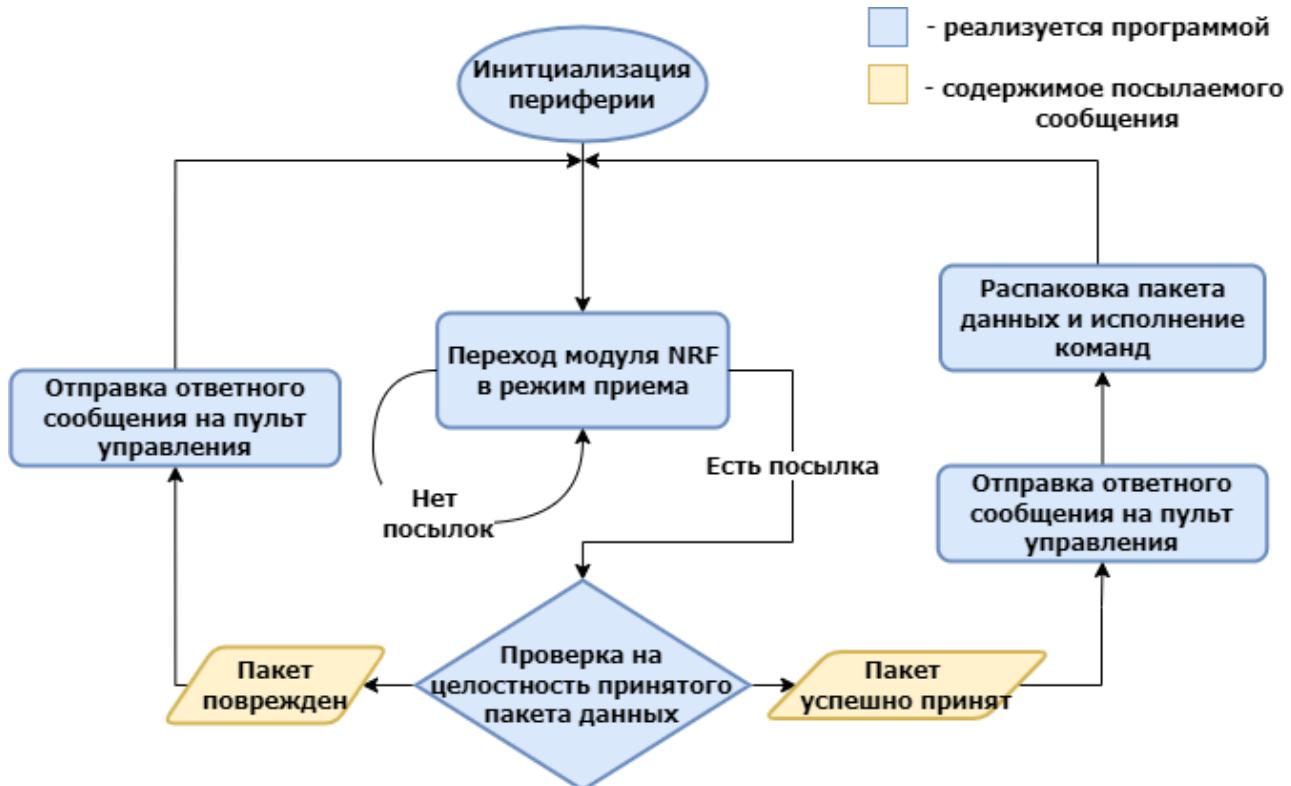


Рис. 4.4. Блок-схема последовательности действий, выполняемых программой в манипуляторе.

### 4.3. Апробация и итоги проделанных работ.

Далее подведем промежуточные итоги касательно тестирования разработанных программных обеспечений в частности и самого манипуляционного робота в целом. Временные рамки и объем задач которое требовалось выполнить наложили временные ограничения на тщательную апробацию конечного робота. Тем не менее, ниже приведены результаты, которые удалось получить до настоящего времени в ходе тестирования конечного устройства:

- Режим работы «Играй», все режимы выбора усилия захвата с применением для соответствующих объектов;
- Открытый доступ к ПО: <https://github.com/SanTech478/UMNO>
- Полезная нагрузка (рекомендуемая): 170 г;
- Рабочий диапазон, мм: 500;
- Масса, кг: 1.48;
- Число степеней подвижности: 5.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результатом выполненной квалификационной работы является разработанный манипуляционный робот, состоящий из манипулятора и устройства дистанционного управления. Процесс разработки включал в себя следующие этапы:

- Обзор существующих на рынке разработок и на основе их анализа постановка требований к собственному роботу;
- 3D-проектирование в T-Flex CAD и 3D-печать конструкции;
- Создание аппаратной части путем выбора электронных компонентов, 3D-проектирование в Altium Designer и изготовление двухсторонних печатных плат по технологиям ЛУТ и фотолитография с использованием фотополимерного 3D-принтера;
- Создание программного обеспечения устройств.

Оригинальность робота заключается в ряде применённых конструкторский и инженерных решений, таких как:

- Приведение в движение 3 пар механических «пальцев», каждая из которых не зависит от движения остальных, с помощью одного мотора что позволило снизить вес рабочего органа манипулятора и количество используемых ресурсов микроконтроллера;
- Изготовление компактной печатной платы расположенной в базе манипулятора с возможностью быстрой замены важных электронных компонентов, что позволило уменьшить габариты до портативных;
- Создание программного обеспечения с открытым доступом для дальнейших модификаций.

Также, были определены перспективные направления для модификаций: увеличение комфорта управления, гибкости движений и специализации; реализация обратной связи, автономии и режима обучения.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. A future that works: Automation, Employment, and Productivity. // McKinsey Global Institute, Jan. 2017
2. Double Digit Growth for Robot Sales in North America. // IFR, International Federation of Robotics. [Электронный ресурс]. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/double-digit-growth-in-north-america>(дата обращения: 02.03.2022)
3. Воробьёв Е. И., Попов С. А., Шевелёва Г. И. Механика промышленных роботов, кн. 1 – М.: Высшая школа, 1988 – 304 с. – ISBN 5-06-001201-8. – с. 4
4. ГОСТ 25686-85. Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения.
5. Авцинов И. А., Битюков В. К. Основы роботизации, гибких производственных систем, организационно-технологического управления и транспортно-складских систем – Воронеж: Воронежская гос. технолог. акад., 2009. – 94 с. – ISBN 5-89448-196-1. – с. 8
6. Иванов А. А. Основы робототехники: учебное пособие – М.: ФОРУМ, 2014. – 224 с. – ISBN 978-5-91134-575-4. – с. 25-26
7. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — 400 с. — ISBN 5-7038-1339-5. – с. 22-25
8. Шахинпур М. Курс робототехники / Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 527 с. — ISBN 5-03-001375-X. – с. 35-39
9. Бурдаков С. Ф., Дьяченко В. А., Тимофеев А. Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов. — М.: Высшая школа, 1986. — 264 с. — с. 6, 21—22
10. Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С. Системы управления манипуляционных роботов. — М.: Наука, 1978. — 416 с. — (Научные основы робототехники). – с. 8

11. Макаров И. М., Топчев Ю. И. Робототехника: История и перспективы. — М.: Наука; Изд-во МАИ, 2003. — 349 с. — (Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения). — ISBN 5-02-013159-8. – с. 183
12. KUKA. KUKA Product Portfolio. Jan. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kuka.com/en-de/services/downloads?terms=Language:en:1;&q=KUKA%20Product%20Portfolio> (дата обращения: 05.03.2022)
13. ABB. ABB IRB14050 YuMi Single-arm Data Sheet. [Электронный ресурс]. URL: <https://webshop.robots.abb.com/us/catalog/product/view/id/60/s/single-arm-yumi-irb-14050-assembly/category/3/> (дата обращения: 05.03.2022)
14. FANUC. FANUC LR 200iD. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.fanuc.com/fvl/vn/product/catalog/LRMateiD\(E\)-07.pdf](https://www.fanuc.com/fvl/vn/product/catalog/LRMateiD(E)-07.pdf) (дата обращения: 05.03.2022)
15. Universal Robots. UR3e technical details. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.universal-robots.com/media/1802780/ur3e-32528\\_ur\\_technical\\_details.pdf](https://www.universal-robots.com/media/1802780/ur3e-32528_ur_technical_details.pdf) (дата обращения: 5.03.2022).
16. DOBOT. DOBOT Magician Specifications. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dobot.cc/dobot-magician/specification.html> (дата обращения: 7.03.2022).
17. SAGA Technologies. Учебный робот SD1-4-320. [Электронный ресурс]. URL: <https://sagacorporation.com/products/interaktivnye-laboratori/SD1-4-320/> (дата обращения: 07.03.2022).
18. Hiwonder. xArm ESP32 Robotic Arm Specification. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hiwonder.hk/collections/robotic-arm/products/xarm-esp32-bus-servo-robotic-arm-powered-by-open-source-esp32-python-programmable-robot> (дата обращения: 07.03.2022).

19. IARDUINO. Образовательный набор – Робот «Манипулятор». [Электронный ресурс]. URL: <https://iarduino.ru/shop/Nabor/robot-laquo-manipulyator-raquo---polnyy-nabor.html> (дата обращения: 07.03.2022).
20. Tower Pro. MG90S digital servo specifications. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.towerpro.com.tw/product/mg90s-3/> (дата обращения: 07.03.2022).
21. Tower Pro. SG90 digital servo specifications. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.towerpro.com.tw/product/sg90-7/> (дата обращения: 07.03.2022).
22. Топ Системы. T-Flex CAD. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tflexcad.ru> (дата обращения: 12.03.2022).
23. Управление информатизации НИЯУ МИФИ. Программное обеспечение для студентов. [Электронный ресурс]. URL: <https://it.mephi.ru/student/software>
24. T-Flex CAD. Учебное пособие online. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tflexcad.ru/help/tutorial/16/index.htm>
25. T-Flex CAD. Обучающие видео уроки. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tflexcad.ru/training/video/>
26. ЦНИИ РТК. Регламент соревнований «Кубок РТК». [Электронный ресурс]. URL: <https://cup rtc ru/rtccup/reglament> (дата обращения: 17.03.2022).
27. Belter JT, Segil JL, Dollar AM, Weir RF. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. *J Rehabil Res Dev.* 2013; 50(5):599–618. URL: <http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2011.10.0188> (дата обращения: 27.03.2022).
28. Московский завод FD Plast. Пластик для 3D-принтера FD. Официальная страница. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fdplast.ru/plastik-dlya-3d-printera/> (дата обращения: 30.03.2022).

29. Nordic semiconductor. NRF24L01+. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF24-series> (дата обращения: 02.04.2022).
30. Леска Клинская. Леска полиамидная в мотках. Основные физико-механические показатели. Официальная страница. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.лескаклинская.рф/leska\\_poliamidnaya\\_v\\_motkakh](http://www.лескаклинская.рф/leska_poliamidnaya_v_motkakh) (дата обращения: 07.04.2022).
31. Леонардо. Нитка капрон 375K 100% полиамид. [Электронный ресурс]. URL: [https://leonardo.ru/ishop/good\\_15211263532/](https://leonardo.ru/ishop/good_15211263532/) (дата обращения: 27.04.2022).
32. Art of Circuits. Coreless Motor 0720. [Электронный ресурс]. URL: <https://artofcircuits.com/product/coreless-motor-0720-7mmx20mm-cw-and-ccw-pair> (дата обращения: 10.05.2022).
33. DIY Mall. TD-8120MG Digital Servo. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.diymalls.com/Waterproof-TD-8120MG-Digital-Servo-20KG> (дата обращения: 13.04.2022).
34. MapleSoft. Robot Manipulators: Position, Orientation and Coordinate Transformations. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.maplesoft.com/content/EngineeringFundamentals/13/MapleDocument\\_13/Position,%20Orientation%20and%20Coordinate%20Transformations.pdf](https://www.maplesoft.com/content/EngineeringFundamentals/13/MapleDocument_13/Position,%20Orientation%20and%20Coordinate%20Transformations.pdf) (дата обращения: 17.04.2022).
35. Sony. Беспроводной контроллер Sony DUALSHOCK®4. Официальная страница. [Электронный ресурс]. URL: <https://store.sony.ru/product/besprovodnoy-kontroller-sony-dualshock-4-313989/> (дата обращения: 10.06.2022).
36. STMicroelectronics. STM32F103C8T6 datasheet. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf> (дата обращения: 08.05.2022).

37. RobotChip. Обзор радио модуля NRF24L01+PA+LNA. [Электронный ресурс]. URL: <https://robotchip.ru/obzor-radio-nrf24l01palna/> (дата обращения: 10.05.2022).
38. VISHAY.128x64 Graphic OLED. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vishay.com/docs/37902/oled128x64dbpp3n00000.pdf> (дата обращения: 12.05.2022).
39. KY-023 joystick module datasheet. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1402034/Joy-IT/KY-023/1> (дата обращения: 13.05.2022).
40. XLSEMI. XL4005 5A 300KHz 32V Bush DC to DC Converter. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.xlsemi.net/datasheet/XL4005%20datasheet-English.pdf> (дата обращения: 17.05.2022).
41. Advanced Monolithic Systems. AMS1117 1A Low Dropout Voltage Regulator. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf> (дата обращения: 17.05.2022).
42. Monolithic Power Systems. MP2307. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document\\_type/Datasheet/lang/en/sku/MP2307/document\\_id/503/](https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP2307/document_id/503/) (дата обращения: 17.05.2022).
43. TOSHIBA. TB6612FNG. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: <https://toshiba.semicon-storage.com/eu/semiconductor/product/motor-drivers/brushed-dc-motor-driver-ics/detail.TB6612FNG.html> (дата обращения: 18.05.2022).
44. Altium Designer. Документация. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.altium.com/ru/documentation/altium-designer>

45. Хабр. Изготовление печатных плат ЛУТ'ом от А до Я. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/451314/> (дата обращения: 22.05.2022).
46. Хабр. Печатные платы с помощью фотополимерного 3D-принтера. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/557188/> (дата обращения: 01.06.2022).
47. Радио Мир. Пленочный фоторезист ПФ-ВЩ-50. [Электронный ресурс]. URL: <https://radiomir-s.ru/химия-для-электроники/фоторезист-пленочный/фоторезист-пленочный-пф-вщ-50-мпф-вщ-200x150мм-листов-в-конверте-толщина-св-чувствит.слоя-50мкм-разреш.способность-102мкм-ту-6-43-1568-93-оп/> (дата обращения: 02.06.2022).
48. Elga Europe. ORDYL Alpha 300 Dry Film. Product Data Sheet. Техническая документация. [Электронный ресурс]. URL: [https://elgaeurope.it/wp-content/uploads/2021/10/Product-Data-Sheet\\_Alpha300.pdf](https://elgaeurope.it/wp-content/uploads/2021/10/Product-Data-Sheet_Alpha300.pdf) (дата обращения: 04.06.2022).
49. Anycubic. Anycubic Photon S. Официальная страница. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anycubic.com/products/anycubic-photon-s> (дата обращения: 04.06.2022).
50. Гелеос. Ламинатор Гелеос ЛМ А4-2Р. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.heleos.ru/catalog\\_laminators/product/laminator\\_geleos\\_lm\\_a4\\_2\\_r/](https://www.heleos.ru/catalog_laminators/product/laminator_geleos_lm_a4_2_r/) (дата обращения: 04.06.2022).
51. EasyElectronics.ru. Получение фотошаблонов в PDF высокого качества. [Электронный ресурс]. URL: <http://we.easylelectronics.ru/HomeTech/poluchenie-fotoshablonov-v-pdf-vysokogo-kachestva.html> (дата обращения: 01.06.2022).
52. SourceForge. Gerbv – a Gerber (RS-274-X) Viewer. [Электронный ресурс]. URL: <https://sourceforge.net/projects/gerbv/> (дата обращения: 01.06.2022).
53. Inkscape. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://inkscape.org/release/inkscape-1.2/> (дата обращения: 01.06.2022).

54. GitHub. UVtools. [Электронный ресурс]. URL:  
<https://github.com/sn4k3/UVtools> (дата обращения: 02.06.2022).
55. Anycubic. Photon Workshop. Официальный сайт. [Электронный ресурс].  
URL: <https://www.anycubic.com/blogs/videos/photon-workshop> (дата обращения: 02.06.2022).
56. ST. STM32CubeIDE. Официальная страница. [Электронный ресурс].  
URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (дата обращения: 07.06.2022).
57. Navvaro J. What every body is saying. //HarperCollins e-books, 2008, 269 p.  
— ISBN 978-0-06-164486-3. – p. 25-34