

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**  
**ITMO University**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**GRADUATION THESIS**

**Разработка и моделирование механики 3Д-принтера на основе шаговых двигателей**

**Обучающийся / Student** Соловьев Михаил Романович

**Факультет/институт/клластер/ Faculty/Institute/Cluster** факультет систем управления и робототехники

**Группа/Group** R34352

**Направление подготовки/ Subject area** 15.03.06 Мехатроника и робототехника

**Образовательная программа / Educational program** Интеллектуальная робототехника 2018

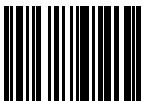
**Язык реализации ОП / Language of the educational program** Русский

**Статус ОП / Status of educational program**

**Квалификация/ Degree level** Бакалавр

**Руководитель ВКР/ Thesis supervisor** Цветкова Мадина Хасановна, кандидат технических наук, Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент")

Обучающийся/Student

Документ подписан	
Соловьев Михаил Романович	
18.05.2022	
(эл. подпись/ signature)	

Соловьев  
Михаил  
Романович

(Фамилия И.О./ name  
and surname)

Руководитель ВКР/  
Thesis supervisor

Документ подписан	
Цветкова Мадина Хасановна	
18.05.2022	
(эл. подпись/ signature)	

Цветкова  
Мадина  
Хасановна

(Фамилия И.О./ name  
and surname)

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**  
**ITMO University**

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ /  
OBJECTIVES FOR A GRADUATION THESIS**

**Обучающийся / Student** Соловьев Михаил Романович

**Факультет/институт/клластер/ Faculty/Institute/Cluster** факультет систем управления и робототехники

**Группа/Group** R34352

**Направление подготовки/ Subject area** 15.03.06 Мехатроника и робототехника

**Образовательная программа / Educational program** Интеллектуальная робототехника 2018

**Язык реализации ОП / Language of the educational program** Русский

**Статус ОП / Status of educational program**

**Квалификация/ Degree level** Бакалавр

**Тема ВКР/ Thesis topic** Разработка и моделирование механики 3Д-принтера на основе шаговых двигателей

**Руководитель ВКР/ Thesis supervisor** Цветкова Мадина Хасановна, кандидат технических наук, Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент")

**Основные вопросы, подлежащие разработке / Key issues to be analyzed**

Разработать механическую часть пятиосевого 3д принтера.

Объектом управления является coreXY механизм 3д принтера с добавлением двух дополнительных осей вращения: ось перпендикулярная плоскости стола принтера (ось alpha) и ось параллельная столу принтера (ось beta). 3Д принтер оснащен каретками, позволяющими раме с экструдером перемещаться по осям x и у. Вал с шариковыми каретками и трапецидальным винтом позволяют столу перемещаться вдоль оси z. Оси alpha и beta закреплены на подшипниках и подключены к шаговым двигателям.

Головная часть 3Д принтера представляет из себя экструдер с радиатором охлаждения и вентиляторами для охлаждения пластика и радиатора, термобарьер, нагревательный блок с датчиком температуры, нагревательный элемент и сопло от 0.1 мм до 0.8 мм.

Необходимо добиться стабильной печати на скорости минимум 20 мм/с.

Размеры основной рамы не больше 600 мм по любой из осей.

Жесткость рамы должна позволять печатать детали с погрешностью не более 1.4 мм.

Принтер должен печатать наиболее распространенными пластиками: PLA, PETG.

Должна использоваться кинематическая схема "CoreXY".

Управляющая плата принтера должна позволить управлять не менее, чем шестью шаговыми моторами для обеспечения печати в пяти осях плюс управление экструдером.

**Форма представления материалов ВКР / Format(s) of thesis materials:**

Конструкторская документация, пояснительная записка и презентация.

**Дата выдачи задания / Assignment issued on:** 07.02.2022

**Срок представления готовой ВКР / Deadline for final edition of the thesis** 20.05.2022

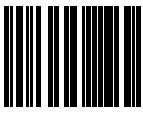
**Характеристика темы ВКР / Description of thesis subject (topic)**

**Тема в области фундаментальных исследований / Subject of fundamental research:** нет /  
not

**Тема в области прикладных исследований / Subject of applied research:** да / yes

**СОГЛАСОВАНО / AGREED:**

Руководитель ВКР/  
Thesis supervisor

Документ подписан	
Цветкова Мадина Хасановна	
11.05.2022	
(эл. подпись)	

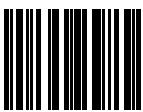
Цветкова  
Мадина  
Хасановна

Задание принял к  
исполнению/ Objectives  
assumed BY

Документ подписан	
Соловьев Михаил Романович	
12.05.2022	
(эл. подпись)	

Соловьев  
Михаил  
Романович

Руководитель ОП/ Head  
of educational program

Документ подписан	
Бобцов Алексей Алексеевич	
12.05.2022	
(эл. подпись)	

Бобцов Алексей  
Алексеевич

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО  
ITMO University**

**АННОТАЦИЯ  
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ  
SUMMARY OF A GRADUATION THESIS**

**Обучающийся / Student** Соловьев Михаил Романович

**Факультет/институт/клuster/ Faculty/Institute/Cluster** факультет систем управления и робототехники

**Группа/Group** R34352

**Направление подготовки/ Subject area** 15.03.06 Мехатроника и робототехника

**Образовательная программа / Educational program** Интеллектуальная робототехника 2018

**Язык реализации ОП / Language of the educational program** Русский

**Статус ОП / Status of educational program**

**Квалификация/ Degree level** Бакалавр

**Тема ВКР/ Thesis topic** Разработка и моделирование механики 3Д-принтера на основе шаговых двигателей

**Руководитель ВКР/ Thesis supervisor** Цветкова Мадина Хасановна, кандидат технических наук, Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент")

**ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ  
DESCRIPTION OF THE GRADUATION THESIS**

**Цель исследования / Research goal**

Проектирование механики 3Д принтера, способного вести печать в пяти осях.

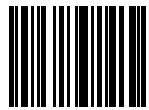
**Задачи, решаемые в ВКР / Research tasks**

Анализ существующих решений в данной области, выбор программы проектирования для создания и визуализации деталей 3Д принтера, подбор материалов для печати деталей, разработка пятиосевого стола, рамы 3Д принтера, механических частей принтера в CAD-системе, проведение расчетов прочности стола и рамы в САЕ-системе, выбор электронных компонентов для управления 3Д принтером, выбор комплектующих для печатающей головы.

**Краткая характеристика полученных результатов / Short summary of results/findings**

Проведен анализ существующих решений в данной области, выбрана программа от Autodesk Fusion 360 для моделирования и визуализации деталей 3Д принтера, выбран полиэтилентерефталатгликоль в качестве основного материала для изготовления деталей для 3Д принтера, разработан пятиосевой стол, разработана рама, созданы детали механических частей принтера в CAD-системе, проведены расчеты прочности в Fusion 360, подобраны электронные компоненты и комплектующие для печатающей головы.

подписан
Соловьев Михаил Романович
18.05.2022



Соловьев  
Михаил  
Романович

(Фамилия И.О./ name  
and surname)

Руководитель ВКР/  
Thesis supervisor

Документ подписан
Цветкова Мадина Хасановна
18.05.2022



Цветкова  
Мадина  
Хасановна

(Фамилия И.О./ name  
and surname)

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
1 Обзор литературы.....	10
1.1 Выбор базы для модификации под принтер с пятью осями ...	12
2 Разработка деталей для модернизации оригинального 3Д принтера	15
2.1 Разработка рамы 3Д принтера.....	15
2.2 Разработка удерживающей стол конструкции .....	16
2.3 Разработка поворотного стола .....	18
2.4 Разработка удерживающей стола конструкции .....	19
2.5 Разработка печатающей головы.....	20
2.6 Модернизация оси Z.....	21
2.7 Крепление концевых датчиков .....	22
2.8 Сборка всей конструкции .....	23
3 Выбор электроники .....	25
4 Выбор прошивки и сборка принтера .....	28
5 Расчет прочности различных деталей принтера .....	30
5.1 Расчет прочности рамы .....	30
5.1.1 Материал .....	30
5.1.2 Результирующие силы .....	30
5.1.3 Исследование смещений .....	31
5.1.4 Исследование напряжений в конструкции .....	31
5.1.5 Исследование результирующих сил.....	32
5.2 Расчет прочности детали, удерживающей стол .....	32
5.2.1 Материал .....	32
5.2.2 Результирующие силы .....	32
5.2.3 Исследование смещений .....	32

5.2.4 Исследование напряжений в конструкции . . . . .	34
5.2.5 Исследование результирующих сил . . . . .	34
5.3 Расчет прочности поворотного стола . . . . .	35
5.3.1 Материал . . . . .	35
5.3.2 Результирующие силы . . . . .	35
5.3.3 Исследование смещений . . . . .	35
5.3.4 Исследование напряжений в конструкции . . . . .	36
5.3.5 Исследование результирующих сил . . . . .	37
5.4 Сравнение рам . . . . .	37
6 Расчет стоимости компонентов . . . . .	39
7 Сборка принтера . . . . .	42
Заключение . . . . .	43
Список использованных источников . . . . .	44
Приложение А Чертежи . . . . .	45
Приложение Б Листинги . . . . .	51

## ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является создание пятиосевого 3Д принтера. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Анализ предметной области;
- Обоснование выбора компонентов;
- Проектирование механики;
- Моделирование механики;

Аддитивные технологии широко применяются при быстром прототипировании различных 3Д моделей. Традиционные 3Д принтеры создают опорные конструкции, которые называются “поддержками”, чтобы напечатать нависающие части модели. Также такие принтеры могут печатать только в одной плоскости. Из-за своих конструктивных особенностей появляются некоторые проблемы. Создание поддержек затрачивает время печати и объем материала, а также ухудшает внешний вид изделия при их отделении от модели. Печать модели слоями в одной плоскости приводит к тому, что прочность модели будет намного ниже при воздействии внешней нагрузки вдоль слоев (или при испытании на изгиб или прочности на растяжение). Из-за таких особенностей изделий, напечатанных на 3Д принтере, проводят испытания (на прочность, на растяжение/сжатие) поперек и вдоль слоев, чтобы точно оценить характеристики материала, из которого печатается модель.

Из-за представленных проблем предлагается создать и промоделировать механику для 3Д принтера, позволяющую печатать без поддержек благодаря введению дополнительных двух осей, что также поможет объемно размещать слои внутри печатаемой модели. Практической значимостью данной работы является то, что разработанное устройство может использоваться для печати более прочных изделий, чем если бы печать велась только с тремя осями. Укладка слоев на таком принтере может происходить не параллельно, что избавит от необходимости затрачивать материал на поддерживающие конструкции.

Основная идея данного проекта заключается в использовании поворотного стола, который будет изменять угол поворота параллельно и перпендикулярно оси z.

В своем проекте я намерен использовать картезианскую кинематическую схему “CoreXY” объединённую с полярной схемой, которую использует компания Polar. Из всех кинематических схем FDM 3Д принтеров, картезианские показывают идеальную стабильность печати. При этом данная схема используется давно любителями и профессионалами в области 3Д печати, поэтому в сети можно найти большое количество информации для построения своего 3Д принтера на основе данной схемы. 3Д принтеры, основанные на полярной схеме, представляют собой экструдер, перемещающийся вверх и вниз, а также поворотный стол. Такие принтеры обладают высокой энергоэффективностью.

## 1 Обзор литературы

В статье [1] рассматривается математическая модель гибридного биполярного шагового двигателя, которую можно использовать при моделировании механики 3Д принтера. В модели используется зависимости токов обмоток, угловой скорости ротора двигателя и угол поворота. Также рассматривается способ линеаризации данной модели. Уравнения данной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_A = -K_m \omega \sin(N_r \theta) \\ e_B = K_m \omega \sin(N_r \theta) \\ \frac{di_A}{dt} = \frac{\nu_A - R i_A - e_A}{L} \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{\nu_B - R i_B - e_B}{L} \\ J \frac{d\omega}{dt} + B \omega = T_e \\ T_e = -K_m (i_A - \frac{e_A}{R_m} \sin(N_r \theta)) + \\ + K_m (i_B - \frac{e_B}{R_m} \sin(N_r \theta)) + K_m (i_B - \frac{e_B}{R_m} \cos(N_r \theta)) - T_d \sin(4N_r \theta) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{array} \right. \quad (1.1)$$

Где  $\nu_A$  – управляющее напряжение, поданное на обмотку А шагового двигателя,  $\nu_B$  – управляющее напряжение, поданное на обмотку В шагового двигателя,  $\omega$  – угловая частота ротора шагового двигателя,  $i_A$  – ток в обмотке А,  $i_B$  – ток в обмотке В,  $\theta$  – угол поворота ротора шагового двигателя,  $J$  – момент инерции,  $L$  – индуктивность обмоток,  $e_A$  – противоэдс в обмотке А,  $e_B$  – противоэдс в обмотке В,  $B$  – коэффициент затухания,  $R_m$  – сопротивление намагничивания,  $T_e$  – электрический крутящий момент. Данные уравнения используются в блоке Stepper motor из пакета Matlab Simulink. Работа этих уравнений была проверена и сравнена с блоком из Simulink. (РИС. 1.1 и РИС. 1.2)

В [2] рассматривается моделирование 3Д принтера в среде MATLAB Simulink с помощью блоков из стандартной библиотеки и блоков из SimMechanics, Simulink 3D-Animation. В этой работе используется двухзвеный механизм и объясняется принцип его работы. Модель построена на основе двигателя постоянного тока. Система уравнений движения

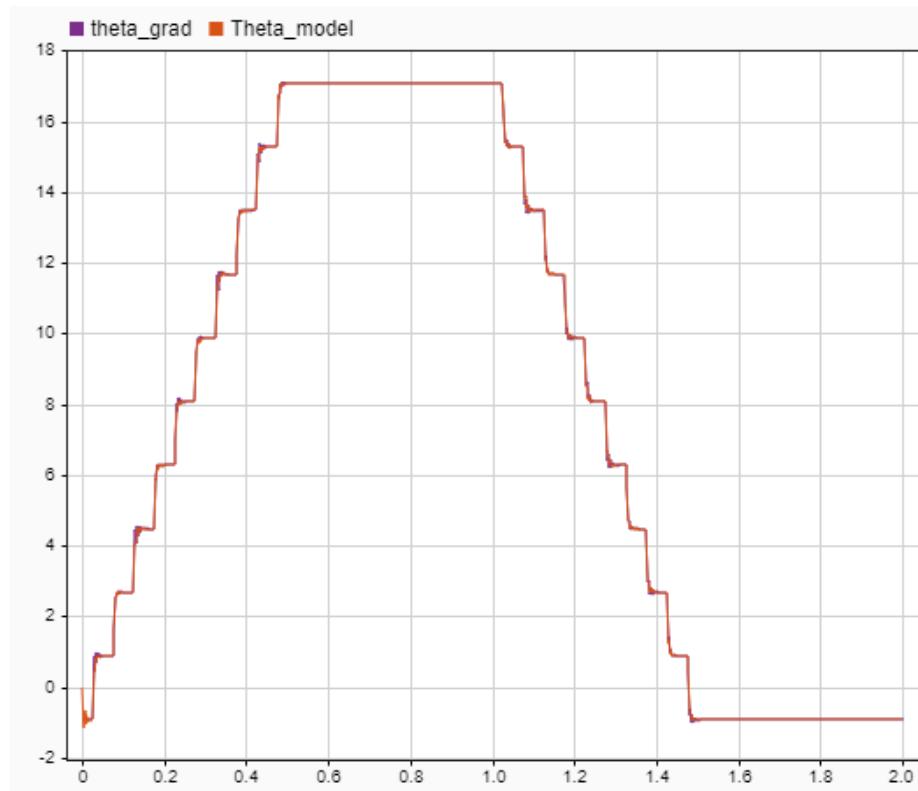


Рисунок 1.1 — График зависимости угла поворота  $\theta$  от времени

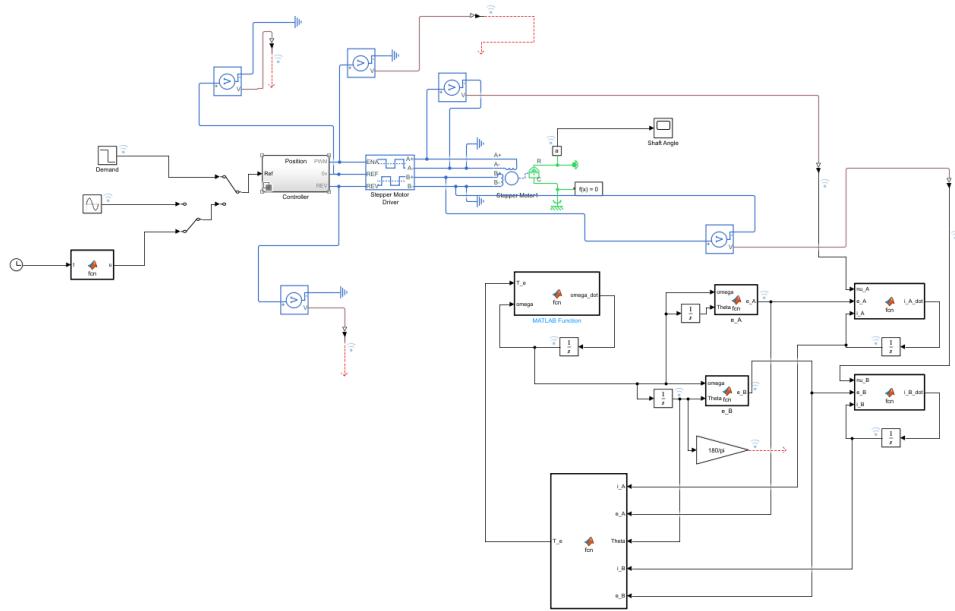


Рисунок 1.2 — Модели “Stepper motor” и модель, сделанная из простейших блоков

электромеханической системы одного звена с электрическим приводом строилась с учетом диссипации энергии в подшипниках привода, в том числе типа сухого трения, а также нелинейных упруго-диссипативных

свойств соединительной муфты с редуктором. В качестве регулятора используется ПИД регулятор. Представленные в статье модели 3Д принтера позволяют на ранних этапах проектирования аддитивного производства оценить работу манипулятора, подобрать коэффициенты для регулятора.

В [3] и [4] представлен пятиосевой 3Д принтер с поворотным наклонным столом. При этом разработчики проекта Erit3d разрабатывают слайсер, который будет способен просчитывать траектории для печати в пяти осях. Данная программа выложена на [github.com](https://github.com). В университете Осло еще в 2015 году представили экспериментальную модель пятиосевого 3Д принтера с расчетами и описанием всех пунктов проектирования [5].

### 1.1 Выбор базы для модификации под принтер с пятью осями

Выбор стоял между схемой H-bot и картезианской. В итоге выбрали за основу проект The RepRap Ormerod с картезианской схемой. Выбор конфигурации стола, экструдера и кинематической схемы для пятиосевого принтера. В данной случае, как и в проекте eprit3D выбрали качающийся поворотный стол:

- a) Выбор базы для модификации под принтер с пятью осями. Выбор стоял между схемой H-bot и картезианской. В итоге выбрали за основу проект The RepRap Ormerod с картезианской схемой.
- б) Выбор конфигурации стола, экструдера и кинематической схемы для пятиосевого принтера. В данной случае, как и в проекте eprit3D выбрали качающийся поворотный стол (РИС. 1.3)
- в) Расположение системы координат. Для удобства оси разместили так, чтобы они пересекались в центре стола.(РИС. 1.4)
- г) Выбор шаговых двигателей. В данном проекте использовались JK42HS34-1334A и SM-42BYG011-25 и 42BYGHM809, так как они подходили под такие характеристики, как момент удержания, номинальный момент, максимальный ток на фазу.

д) Выбор контроллера для 3Д принтера. На момент 2015 года разработчики решили использовать материнскую плату “Duet” с модулем расширения, позволяющим управлять дополнительными шаговыми двигателями. На сегодняшний день есть намного больше лучших решений, например платы серии Octopus от компании Bigtreeetech, в которых возможно подавать до 60 вольт на каждый шаговый мотор, имеется поддержка драйверов шаговых двигателей TMC2209, TMC5160, в которых возможно дробить шаг на 128, что дает огромную точность при печати. Также данная плата имеет 32 битный контроллер STM32F429.

е) Расчет точности поворотной системы. Точность была рассчитана на дуге поворотного стола, с дроблением шага на 16 погрешность была равна 0.13745 мм.

ж) Разработка печатающей головы.

и) Разработка деталей, отвечающих за ось z. В нашем случае это будет привод, состоящий из четырех шаговых двигателей, передающих крутящий момент на шкив с восьмьюдесятью зубьями, тот в свою очередь передает момент на вал и на ремень, поднимающий портал с механикой, отвечающей за оси x и y.

к) Разработка системы, отвечающей за концевой механизм.

л) Выбор экструдера.

м) Изготовления и покупка всех деталей.

н) Сборка 3Д принтера.

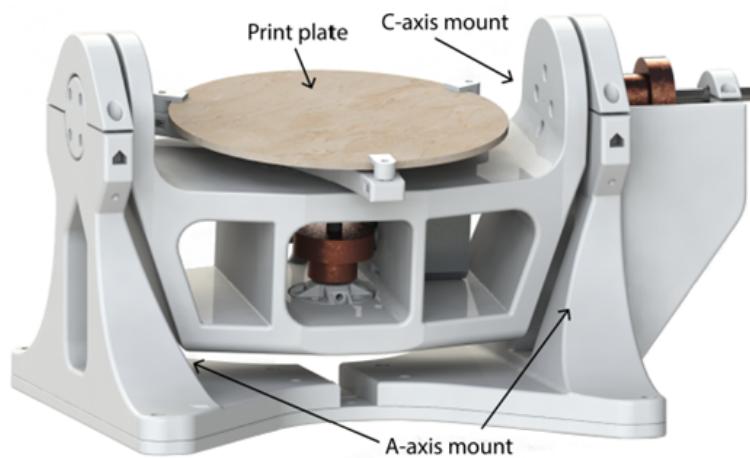


Рисунок 1.3 — Поворотный стол.

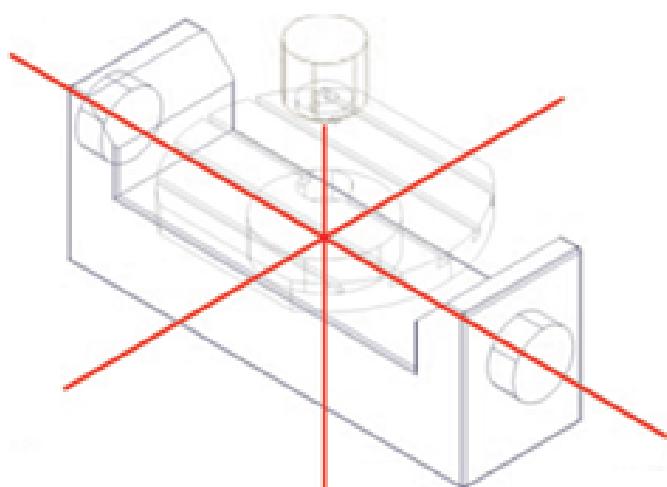


Рисунок 1.4 — Пересечение осей поворота центра стола.

## 2 Разработка деталей для модернизации оригинального 3Д принтера

В данном разделе рассказывается о проектировании механизма поворотного стола, печатающей головы, деталей, отвечающих за ось z, концевых датчиков.

### 2.1 Разработка рамы 3Д принтера

Рама собирается из конструкционных профилей 20x20 из сплава AlMgSi 6063 T66 (РИС. 2.1). Конструкция была улучшена дополнительными профилями для увеличения высоты и жесткости принтера. В середине профиля в отверстии 5 мм прорезается резьба под М6 болт, который позволяет крепить между собой конструкционные профили.

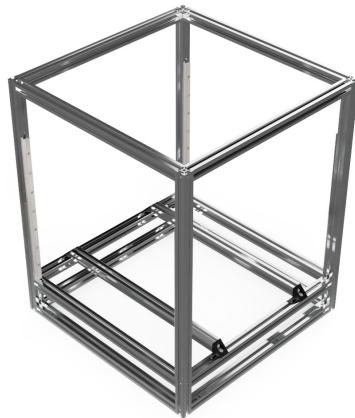


Рисунок 2.1 — Рама 3Д принтера из конструкционного профиля.

## 2.2 Разработка удерживающей стол конструкции

В качестве подшипников были выбраны радиальный шариковый упорный подшипник качения, удерживающий нагрузки вдоль оси, перпендикулярной основной плоскости держателя стола, и радиальный шариковый подшипник качения, устанавливающийся на вал 8 мм в отверстие в центре стола, а также в отверстия, отвечающие за крепление держателя стола вдоль оси alpha. (РИС. 2.2)

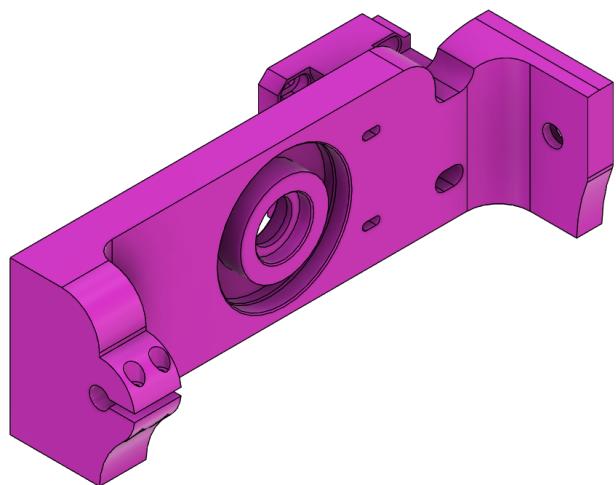


Рисунок 2.2 — Держатель стола

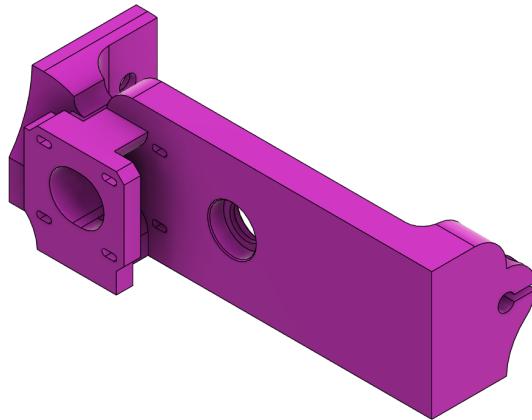


Рисунок 2.3 – Обратная сторона держателя стола.

Конструкция была оптимизирована для печати на 3Д принтере без поддержек (РИС. 2.3). К нижней части крепится шаговый двигатель, на котором размещается шкив, передающий воздействие на более большой шкив, закрепленный на валу в центре стола. Используются валы диаметром 8 мм для закрепление вращающегося стола, а также самой держащей стол конструкцию. Вал прилегает к подшипникам 625ZZ с внутренним диаметром 8 мм, при этом они удерживают нагрузку параллельную плоскости стола. Для удержания нагрузок, дающих момент перпендикулярно поверхности стола, используется упорный шариковый подшипник XC51107. Выбор шариковых подшипников обусловлен тем, что в 3Д принтере не имеется больших нагрузок, а также потери энергии на трении у них меньше, чем на роликовых подшипниках.

Данная конструкция была напечатана из полиэтилентерефталатгликоля (пэтг.). Данный материал подходит для изготовления удерживающей стол конструкции, так как были проведены расчеты, показывающие, что при максимальных нагрузках деформация достигает не больше 14 мкм в области у крепления шагового двигателя.

Так как в конструкции используется ПЭТГ пластик, нагрев стола не рекомендуется. Печать планируется вести с помощью полилактида (ПЛА), не требующего нагрева стола. В будущем планируется изготовить данную деталь из металла.

### 2.3 Разработка поворотного стола

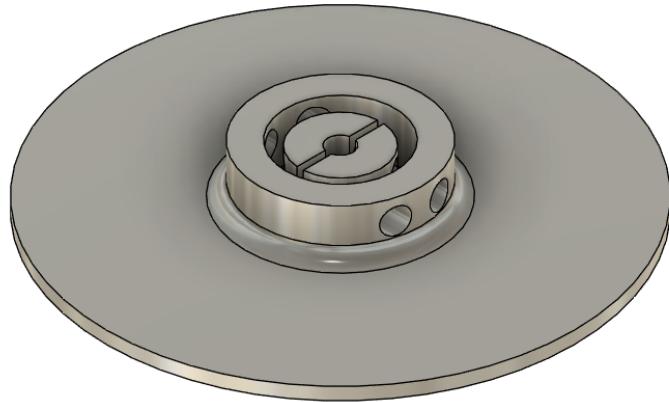


Рисунок 2.4 — Поворотный стол.

Данная модель изготавливается из пластика, что подразумевает отсутствие нагрева для печатаемых моделей, поэтому тестовые модели получится напечатать только из полилактида. В самом центре стола расположено отверстие под вал, который обжимается двумя болтами с гайками, при этом внешнее кольцо служит для установки стола на упорный подшипник. Также во внешнем кольце присутствуют четыре отверстия для установки болтов, гаек и для доступности до них шестигранником. (РИС. 2.4) На верхней части стола будет установлено стекло. В будущем планируется расширить количество материалом, которыми можно будет печатать на данном 3Д принтере, поэтому стол будет переработан для фрезеровки из металла.

## 2.4 Разработка удерживающей стола конструкции

На рисунке 2.4 изображены детали, позволяющие прикрепить поворотный стол к раме 3Д принтера. В данной конструкции используется такие же шкивы, как у поворотного стола. (РИС. 2.5) Данные детали

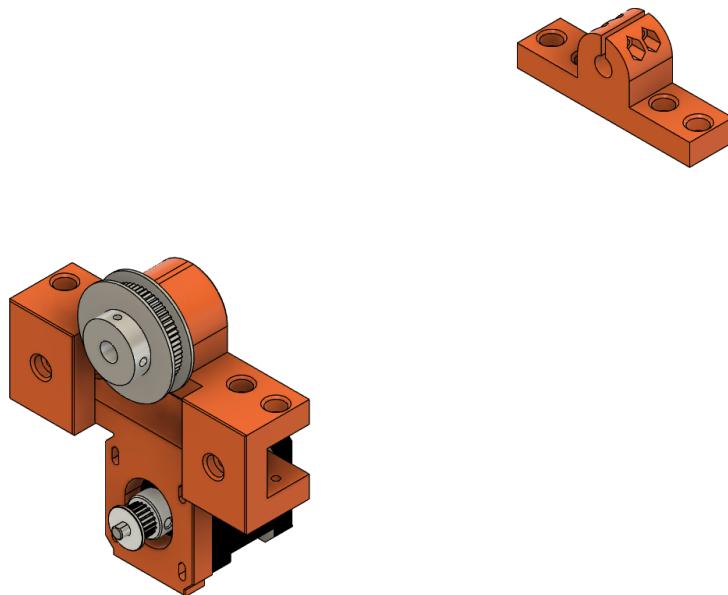


Рисунок 2.5 – Крепежи поворотного стола к раме 3Д принтера.

крепятся к двум алюминиевым профилям 20x20 мм с помощью т-гаек, которые вставляются в пазы профилей. В креплениях шагового двигателя предусмотрены вытянутые отверстия, которые помогают натянуть ремень. В правом креплении (РИС. 2.5) расположен подшипник, который дает свободно проворачиваться валу, который соединяет это крепление с удерживающей стол конструкцией.

## 2.5 Разработка печатающей головы

Печатающая голова имеет механизм прямой подачи пластика, то есть экструдер находится на самой печатающей голове (РИС. 2.6). Обдув осуществляется турбиной. Для удобства обдув проходит через всю печатную голову вниз через канал диаметром 5 мм. Сделано это для установки компрессорного обдува вместо вентилятора. В правой нижней части установлен концевой датчик “BL touch” для установки нулевого положения оси z и для выравнивания портала принтера относительно стола. Выравнивание портала работает следующим образом: концевой датчик собирает карту криволинейности стола, после чего контроллер высчитывает, как нужно выровнить каждый из составляющих ось z шаговых двигателей, чтобы плоскость портала стала параллельно плоскости стола. Разработка своей печатающей головы велась с целью установки прямого экструдера “Mellow wind”.

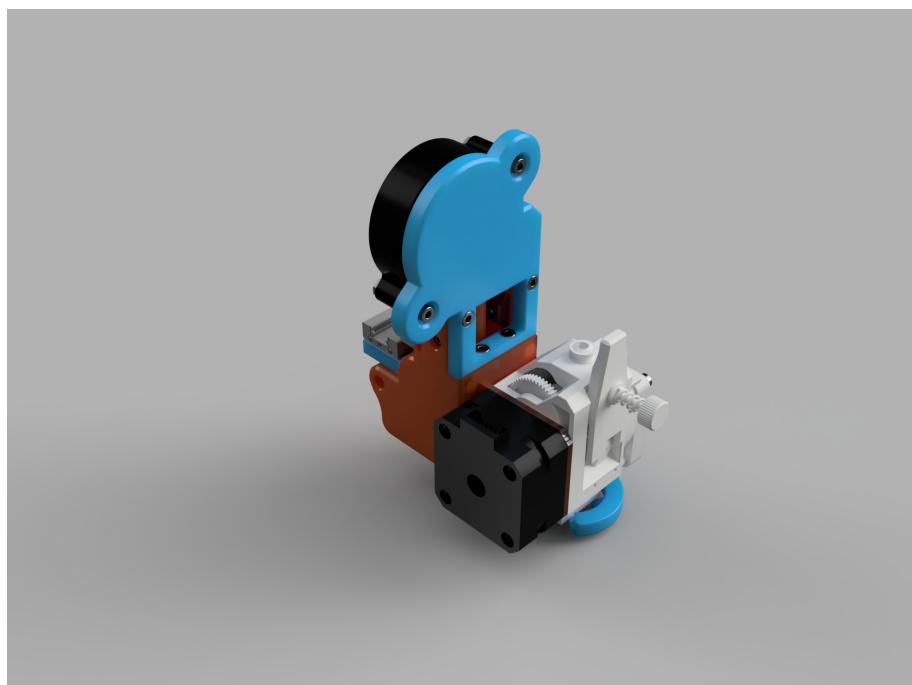


Рисунок 2.6 – Печатающая голова в сборе

## 2.6 Модернизация оси Z

В оригинальном 3Д принтере использовались шкивы и подшипники оси z на валу 5 мм, а также ремни шириной 9 мм. При проведении анализа рынка России, оказалось, что выгоднее покупать ремни на 10 мм, шкивы на 80 зубов были куплены на вал 8 мм, в отличие от оригинальных на 5 мм. Остальные детали 3Д принтера были также адаптированы под новые размеры ремней и шкивов. (РИС. 2.7) В конструкции привода имеется удобный механизм натяжения ремней, который активируется легким нажатием на рычаг.

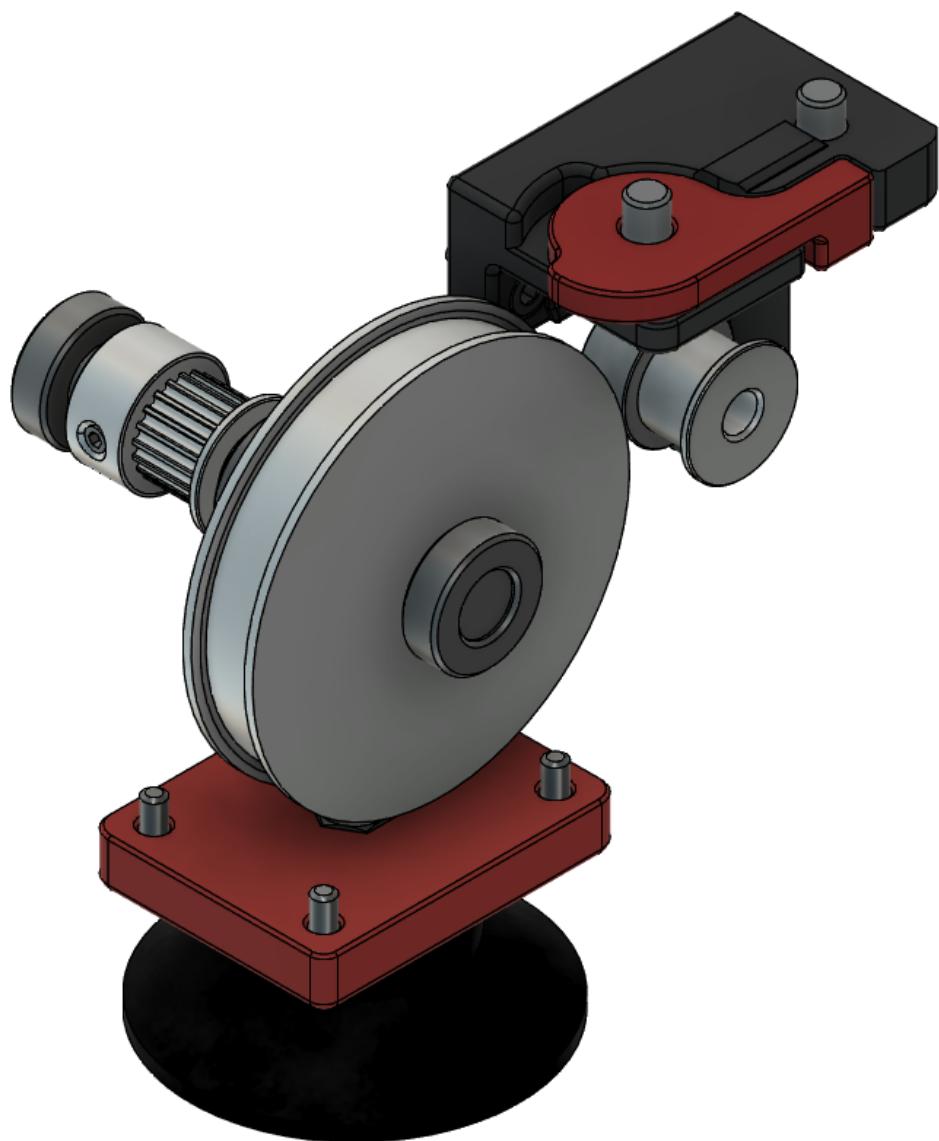


Рисунок 2.7 — Привод оси Z

## 2.7 Крепление концевых датчиков

Модуль датчика оптического концевика крепится к части, соединяющей линейные направляющие осей х и у в правой части 3Д принтера (РИС. 2.8). При этом детали, активирующие датчики находятся на печатающей голове и на линейной направляющей оси z (РИС. 2.9). В плате управления 3Д принтера встроен триггер Шмитта, который благодаря петле гистерезиса позволяет убрать воздействия шумов, которые могут возникнуть в проводах, например от наводок. Оптические концевые датчики представляют собой примник и излучатель, при пересечении луча света на приемнике возникает низкий уровень сигнала, что говорит об активации переключателя. Датчики имеют довольно большую точность, но имеют недостатки в условиях непостоянного освещения, которое может привести к ложному срабатыванию или к несрабатыванию. Поэтому для правильной работы необходимо размещать 3Д принтер в темных местах.

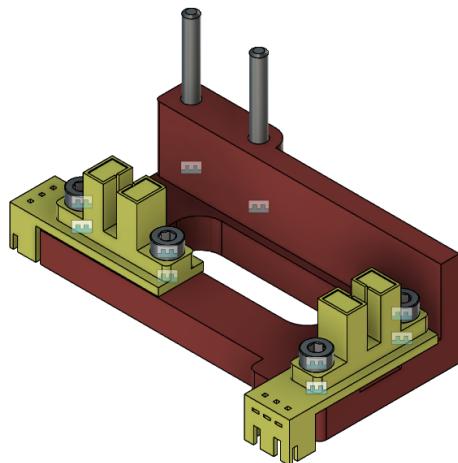


Рисунок 2.8 — Оптические концевые датчики и крепление для них.

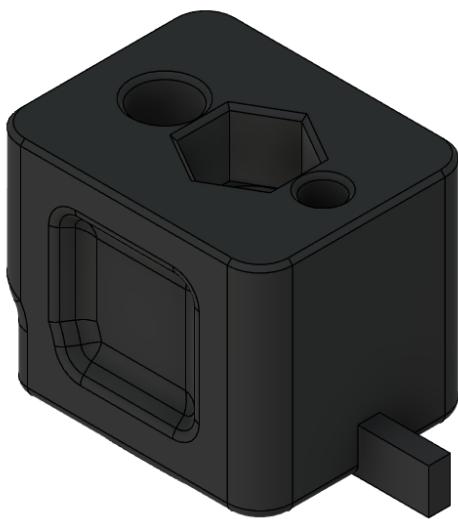


Рисунок 2.9 — Активатор оптического датчика на линейной направляющей оси z.

## 2.8 Сборка всей конструкции

В данном разделе показана общая сборка всех деталей поворотного стола, а также рама 3Д принтера. В принтере используются двигатели “Nema 17”. При сборке стол зажимается болтами и гайками М3 на валу, при этом он упирается в упорный подшипник у основания стола. На стол планируется установить пленку или стекло для хорошего прилипания деталей. Рама принтера собирается из алюминиевых профилей, которые отрезаны под нужный размер с завода.

Печать деталей производилась из полиэтилентерефталатгликоля. В будущем планируется изменить состав некоторых деталей, которые будут подвержены большим температурам, на АБС пластик.

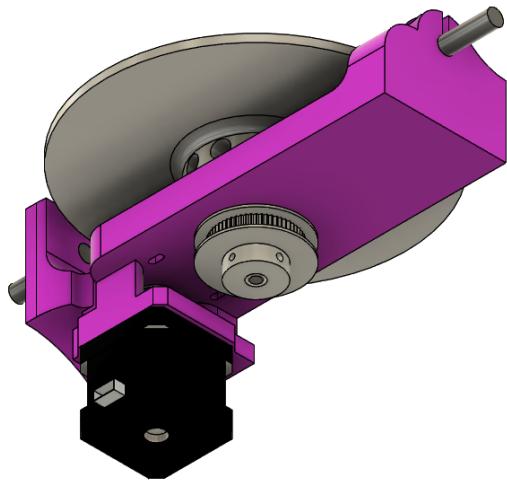


Рисунок 2.10 — Сборка всех деталей поворотного стола.

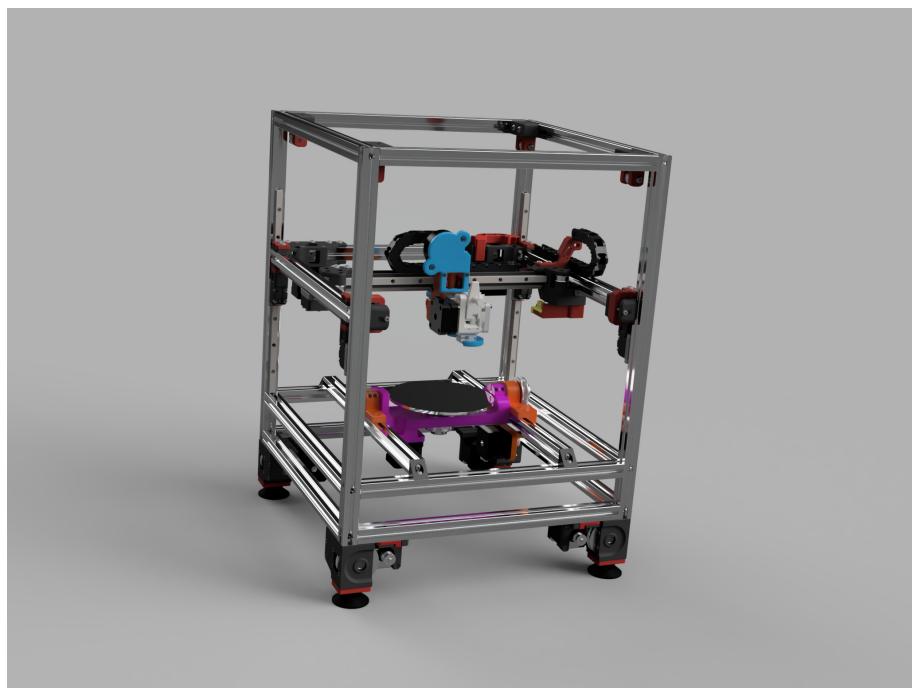


Рисунок 2.11 — Общая сборка 3Д принтера.

### 3 Выбор электроники

В качестве управляющих шаговыми двигателями плат я выбрал материнскую плату от принтера ender 3 (РИС. 3.1) и octopus pro (РИС. 3.2). Первая плата будет использоваться для управления осью z, так как на ней установлено четыре шаговых двигателя. Octopus будет управлять осями x, y, alpha, beta, и экструдером, давящим пластик. Оставшиеся свободные оси планируется использовать для управления механизмом смены филамента.

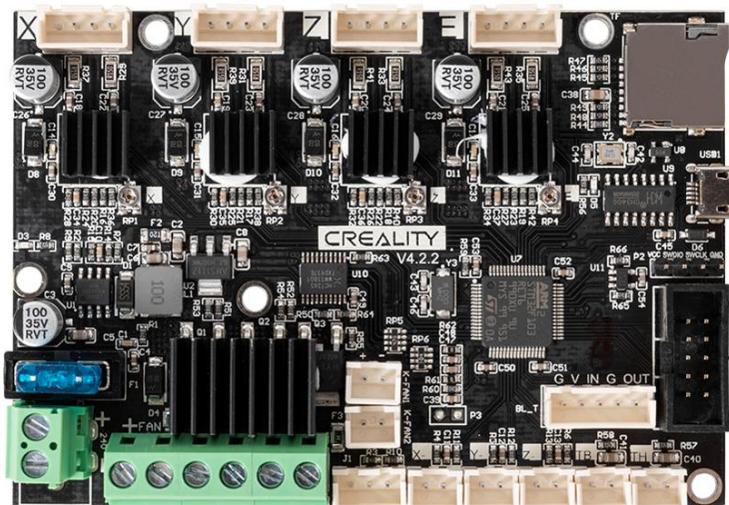


Рисунок 3.1 — Материнская плата creality 4.2.2.



Рисунок 3.2 – Материнская плата octopus pro v1.0.

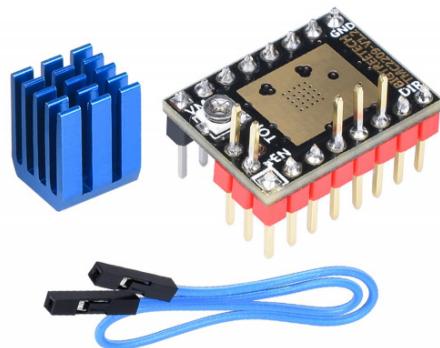


Рисунок 3.3 – Драйвер шагового двигателя tmc2209.

Octopus pro имеет чип управления STM32F446ZET6. Она поддерживает до четырех нагревателей. Обеспечивает отдельные входы питания для двигателей, обогрева стола, логики, вентиляторов, нагрева сопла. Поддерживает входы питания на 12 и 24 В. Есть возможность подключения до шести вентиляторов с ШИМ управлением и двух без управления. Имеет usb-с с последовательным портом, что позволяет печатать через этот разъем. Даёт возможность включать два шаговых двигателя параллельно к драйверу оси z. параллельный привод с двойной осью Z. Предоставляет интерфейс для подключения WIFI модулей на основе ESP8266. В проекте используются драйвера TMC2209 (РИС. 3.3), способные дробить шаг до 256 микрошагов и блок питания на 600 Вт (РИС. 3.4), а также блок питания 5 В для одноплатного компьютера (РИС. 3.5).



Рисунок 3.4—Блок питания 24 В для материнской платы



Рисунок 3.5—Блок питания 5 В для одноплатного компьютера

## 4 Выбор прошивки и сборка принтера



Рисунок 4.1 — Прошивка klipper и одноплатный компьютер orange pi 3 LTS.

В качестве прошивки в проекте используется klipper, так как с него удобно управлять несколькими материнскими платами от принтеров. В качестве сердца моего принтера выступает orange pi 3 lts.

Использование данного сочетания прошивки и мощного одноплатного компьютера, объединенных с несколькими микроконтроллерами, позволяет улучшить качество и скорость печати. Клиппер берет на себя нагрузку для вычислений управляющих сигналов на шаговые двигатели и передает инструкции микроконтроллеру.

Также данная прошивка может выполнять такие функции, как “smooth pressure advance”, которая позволяет дополнительно вычислять и учитывать поток жидкости в сопле экструдера. Также в клиппере есть функция, позволяющая убирать “эхо”, возникающее из-за эффектов резонанса в мехнике 3Д принтера.

Все вышеперечисленные преимущества стали решающими при выборе управляющей программы для 3Д принтера.



Рисунок 4.2 – Процесс фрезеровки конструкционных профилей в фаблабе.

На РИС. 4.2 можно увидеть процесс фрезеровки конструкционных профилей на фрезере в фаблабе итмо.

## 5 Расчет прочности различных деталей принтера

### 5.1 Расчет прочности рамы

#### 5.1.1 Материал

В качестве рамы были выбраны конструкционные профили 20x20 мм. из сплава AlMgSi 6063 T66.

#### 5.1.2 Результирующие силы

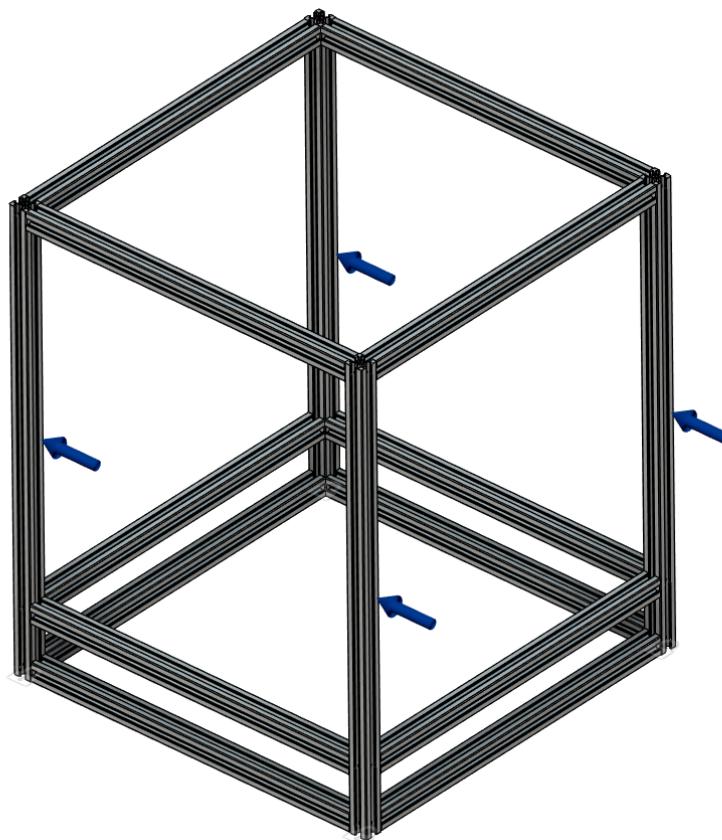


Рисунок 5.1 — Места, на которые воздействует сила.

Выбор этих мест обусловлен тем, что там находятся линейные направляющие, которые удерживают портал с печатающей головой и на них идет вся нагрузка.

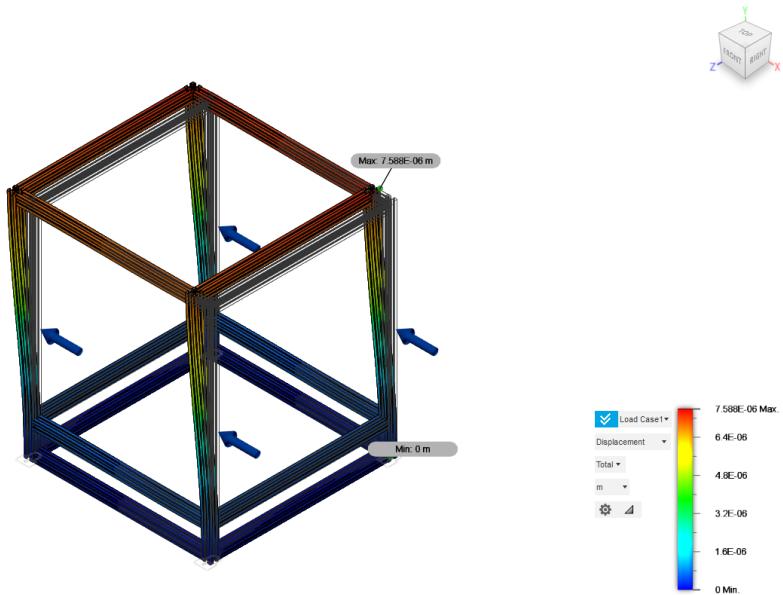


Рисунок 5.2 — Карта смещений

### 5.1.3 Исследование смещений

Результаты исследований: при воздействии сил размерностью в 3 Н, максимальное смещение рамы достигает 7,588 мкм. в верхней части.

### 5.1.4 Исследование напряжений в конструкции

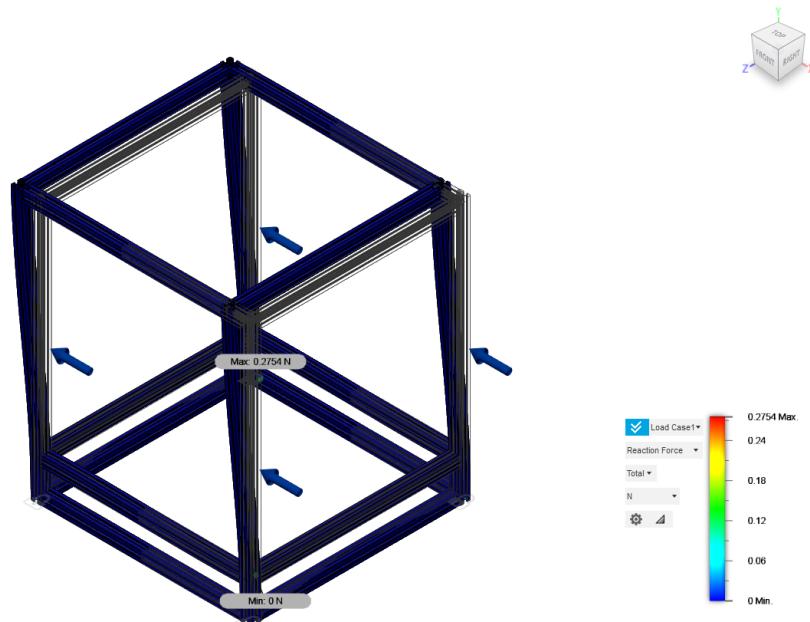


Рисунок 5.3 — Карта напряжений в конструкции

Результаты исследований: минимальное напряжение составляет 12,98 Па, максимальное 0,9081 МПа.

### 5.1.5 Исследование результирующих сил

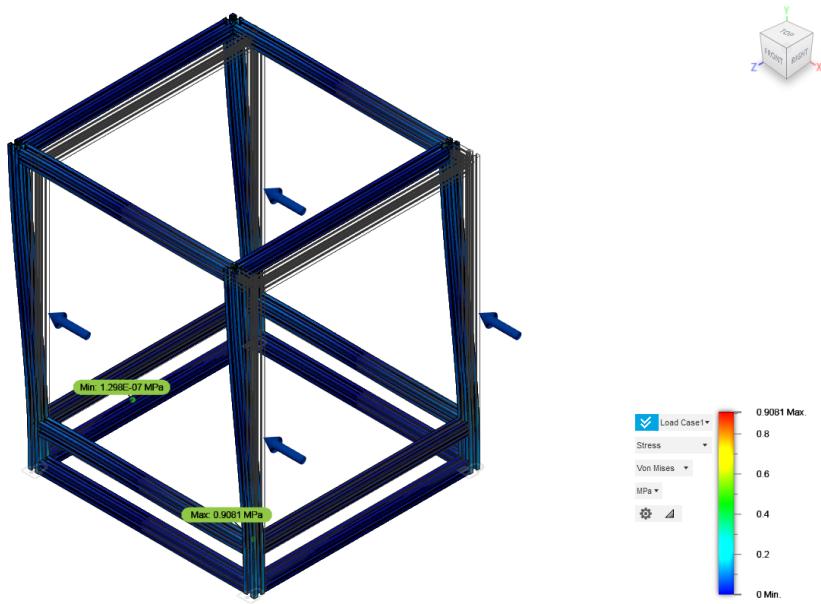


Рисунок 5.4 – Карта сил реакций

Результаты исследований: максимальное напряжение в конструкции равно 0,2754 Н.

## 5.2 Расчет прочности детали, удерживающей стол

### 5.2.1 Материал

В качестве материала был выбран пластик PETG. Конструкция напечатана на 3Д принтере.

### 5.2.2 Результирующие силы

### 5.2.3 Исследование смещений

Результаты исследований: максимальное смещение рамы достигает 13,71 мкм. в верхней части.

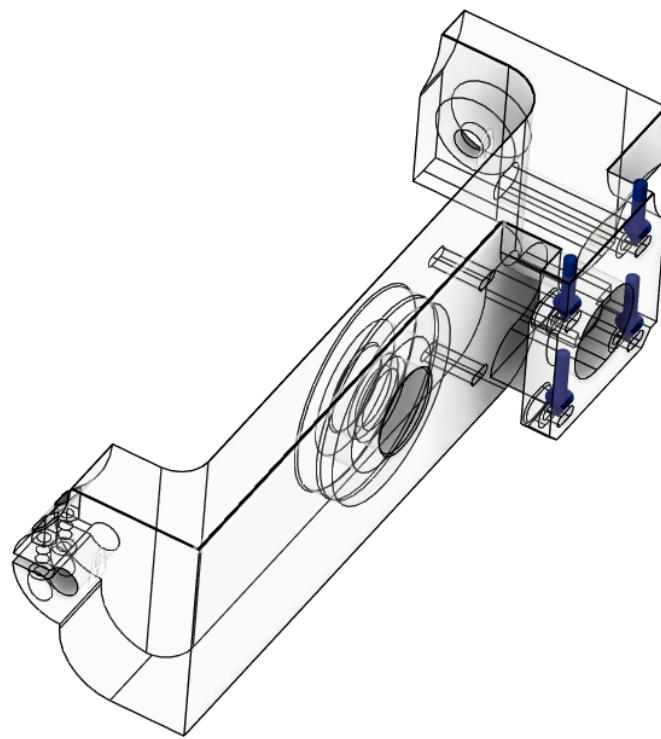


Рисунок 5.5 — Места воздействия сил, выбранные на месте крепления шагового двигателя.

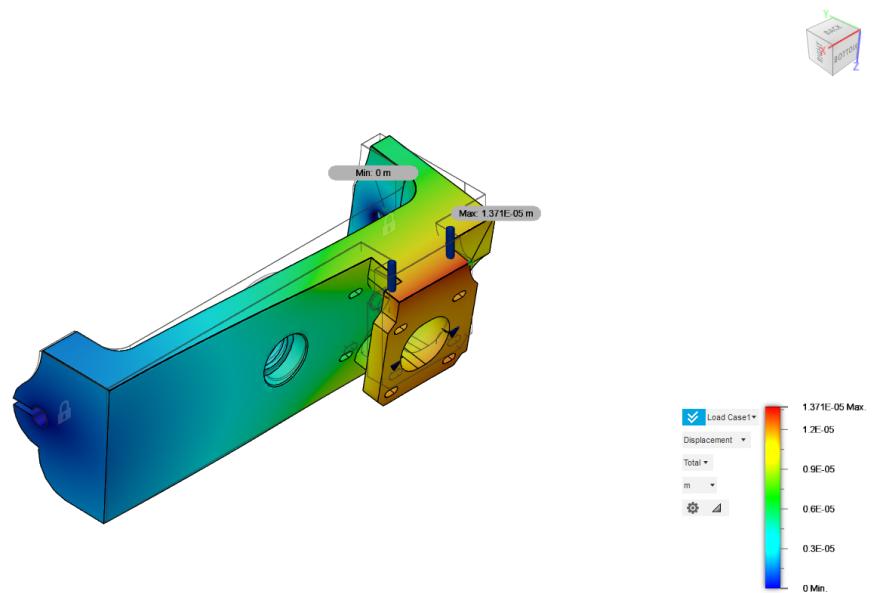


Рисунок 5.6 — Карта смещений

#### 5.2.4 Исследование напряжений в конструкции

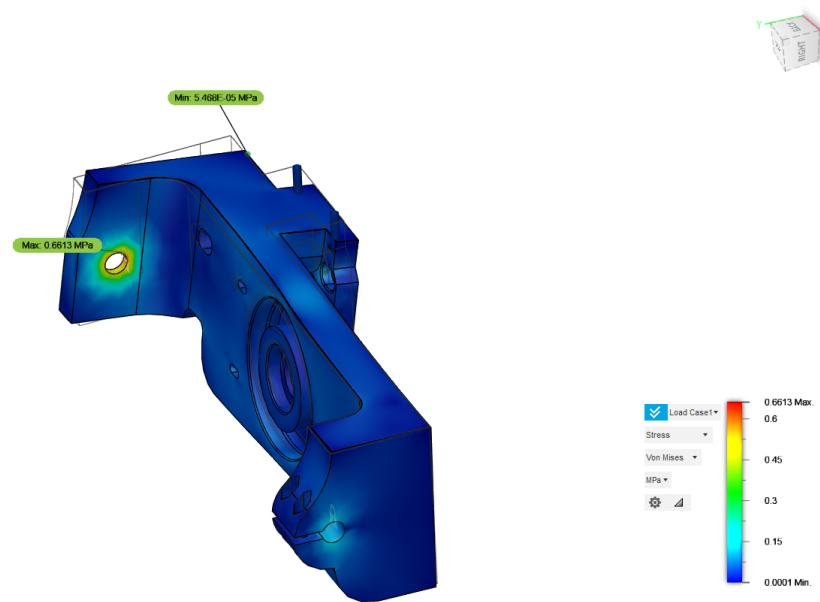


Рисунок 5.7—Карта напряжений в конструкции

Результаты исследований: минимальное напряжение составляет 54,68 Па, максимальное 0,6613 МПа.

#### 5.2.5 Исследование результирующих сил



Рисунок 5.8—Карта сил реакций

Результаты исследований: максимальное напряжение в конструкции равно 2,374 Н.

### 5.3 Расчет прочности поворотного стола

#### 5.3.1 Материал

В качестве материала поворотного стола был выбран пластик PETG. Конструкция напечатана на 3Д принтере.

#### 5.3.2 Результирующие силы

Место приложения силы выбрано на краю детали. Сила эквивалентна весу детали массой 100 гр.

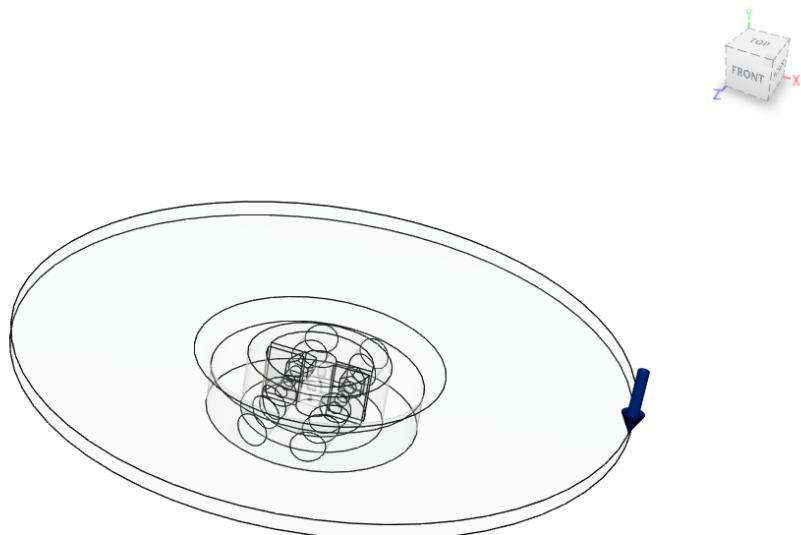


Рисунок 5.9 — Точка приложения силы

#### 5.3.3 Исследование смещений

Результаты исследований: максимальное смещение достигает 36,12 мкм. на месте приложения силы.

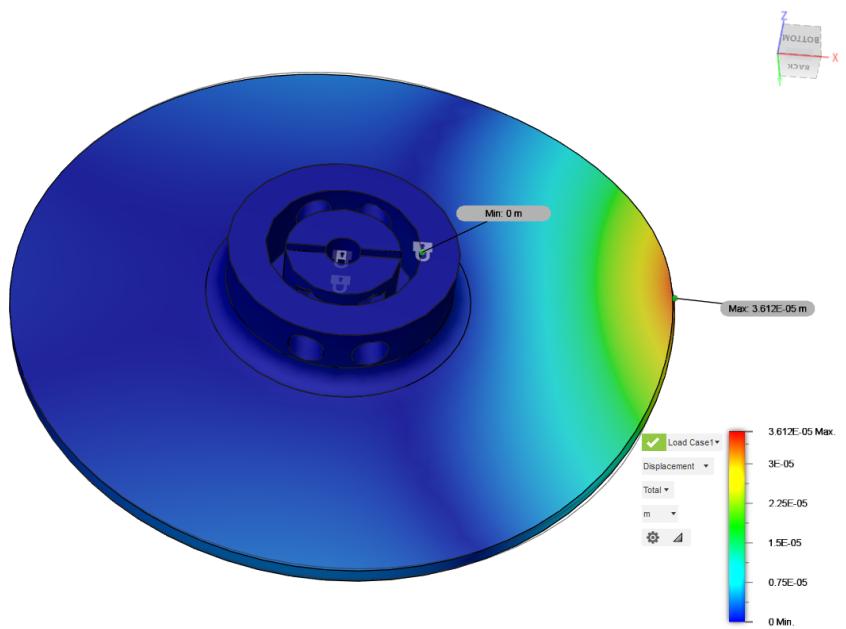


Рисунок 5.10 — Карта смещений

### 5.3.4 Исследование напряжений в конструкции

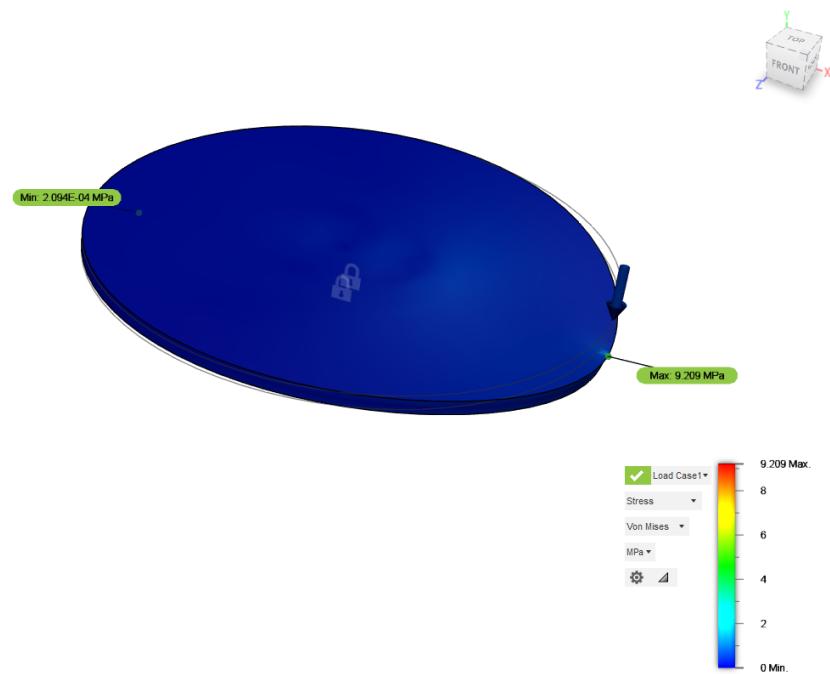


Рисунок 5.11 — Карта напряжений в конструкции

Результаты исследований: минимальное напряжение составляет 209.4 Па, максимальное 9,209 МПа.

### 5.3.5 Исследование результирующих сил

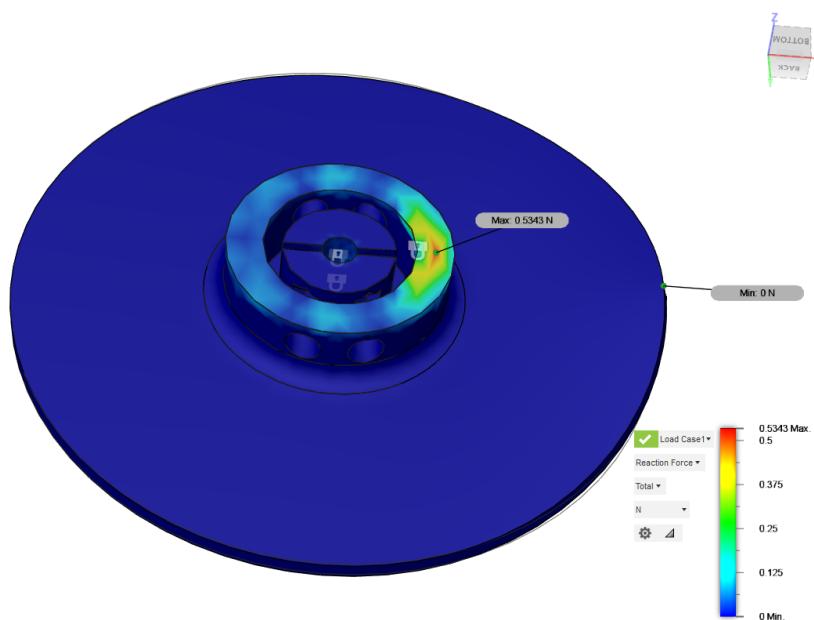


Рисунок 5.12 — Карта сил реакций

Результаты исследований: максимальное напряжение в конструкции равно 0,5343 Н.

## 5.4 Сравнение рам

Сравним рамы разработанного пятиосевого принтера с принтером “Voron 2.4”. На РИС. 5.13 видно, что максимальное смещение рамы немного больше, чем у рамы пятиосевого принтера и составляет 8,0203 мкм. В сравнении с 7,588 мкм это немного больше, но все равно незначительно. Из этого можно сделать вывод, что в будущем ребра жесткости необходимо ставить между верхними и нижними.

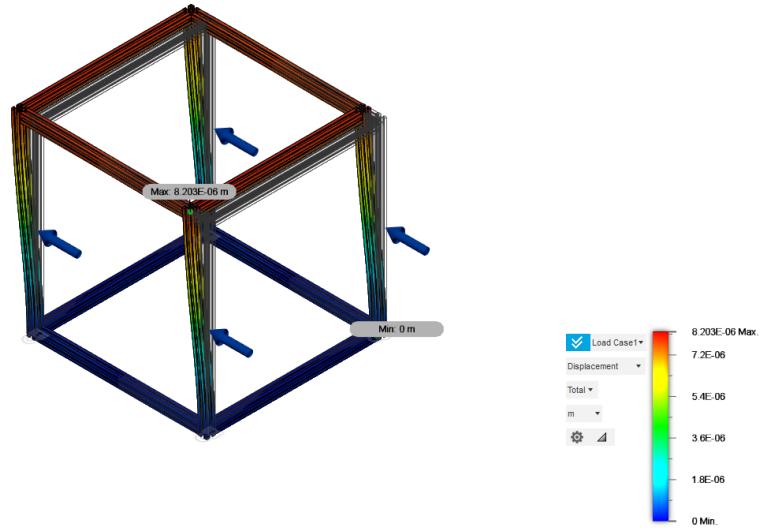


Рисунок 5.13 — Карта смещений

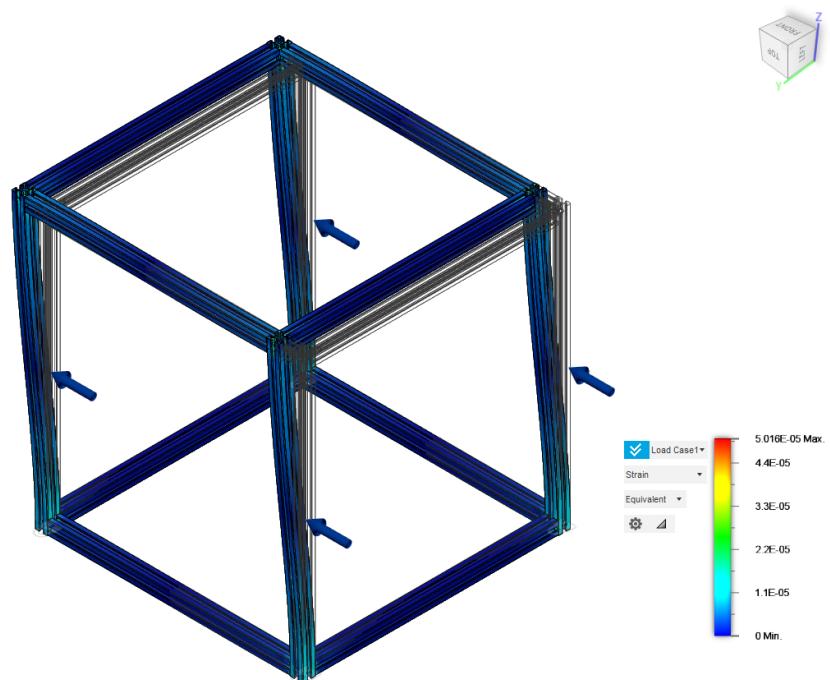


Рисунок 5.14 — Эпюра с изображением напряжений

## 6 Расчет стоимости компонентов

Таблица 6.1 — Расчет стоимости комплектующих.

Наименование	Цена за одну штуку (руб.)	Количество (шт.)	Стоимость (руб.)
Подшипник 625ZZ	75	4	300
Шкив GT2 60 зубьев, 8 мм	365	2	730
Шкив 20 зубьев, 5мм для ремня 6 мм	173	6	1038
Подшипник XC51107	132	1	132
Линейная направляющая MGN9H 300 мм	1085	8	8680
Угловое крепление для профиля 20x20 мм	310	4	1240
Алюминиевый профиль (8.41 м)	5793	1	5793
Шкив 20 зубьев, 6 мм	177	2	354
Подшипник F695-2RS	32.6	20	652
Шкив GT2 20 зубьев 6 мм для ремня 10 мм	231	4	924
Ремень GT2 6мм 1 м	173	4	692
Ремень GT2 10 мм 1 м	288	4	1152
Шайба 5x10x1 мм	5.4	20	108
Подшипник 688zz	68	12	816

Таблица 6.2 — Расчет стоимости комплектующих.

Наименование	Цена за одну штуку (руб.)	Количество (шт.)	Стоимость (руб.)
Оптический концевик	186	2	372
Din рейка 400 мм	67	2	134
Блок питания 5 В, 25 ВТ	504	1	504
Блок питания 24 В, 600 ВТ	2310	1	2310
Однофазное твердотельное реле 220 В	529	1	529
Одноплатный компьютер Orange pi 3 LTS	2524	1	2524
Плата управления Octopus v1.0 pro	6132	1	6132
Экструдер Mellow WIND	3903	1	3903
Шаговый двигатель Nema 17 4202C	411	8	2055
Шаговый двигатель Nema 17HS4023	706	1	706
Латунная вплавляемая гайка M3x5x3,8	8,58	18	154,44
Вентилятор 5015 24 В	360	1	360
T-гайка 5 мм в паз 6 мм	16	44	704
T-гайка 3 мм в паз 6 мм	16	40	640
Плата управления Creality 4.2.2	1802	1	1802
Винт с полукруглой головкой ISO7380 M6x8	12	24	288

Таблица 6.3—Расчет стоимости комплектующих.

Наименование	Цена за одну штуку (руб.)	Количество (шт.)	Стоимость (руб.)
Винт M6x16 DIN 7380	14	28	392
M3x8 DIN 912	2	76	102
M3x12 DIN 912	3	3	9
Гайка М3	4	6	24
M3x16 DIN 912	8	6	48
M3x14 DIN 912	8	2	16
M3x10 DIN 912	7	2	14
M6x16 BHCS	14	28	392
M3x20 DIN 912	5	16	80
M5x30 BHCS	15	8	120
M3x30 SHCS	6	13	78
M5x16 BHCS	8	10	80
M3x40 SHCS	12	27	324
Гайка М5	3	4	12
M3x37 SHCS	10	3	30
M3x23 DIN 912	8	2	16
M5x30 BHCS	12	4	48
M5x40 SHCS	8	4	32
M5x10 BHCS	7	23	161
M3x6 SHCS	3	9	27
M3x16 DIN 912	5	12	60
Всего	-	-	47 793

## 7 Сборка принтера

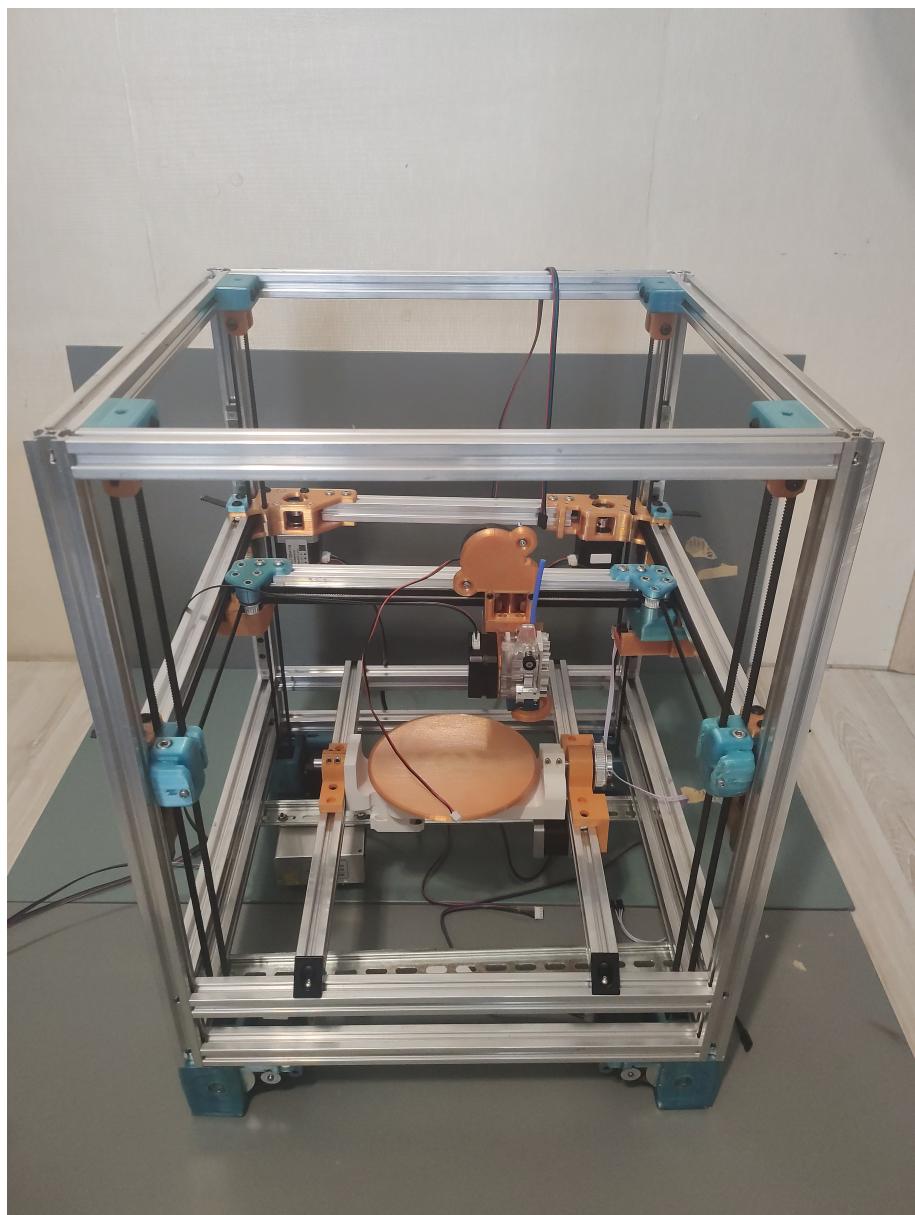


Рисунок 7.1 — Собранный принтер

На РИС. 7.1 изображен собранный пятиосевой 3Д принтер (Механика и часть электроники). Печать велась на 3Д принтере “Creality Ender 3” из материала ПЭТГ.

В процессе сборки возникали трудности в перпендикулярном расположении конструкционных профилей относительно друг друга, проблему решило использование строительного угольника. Также возникали проблемы с рельсами, которые имели неровные подшипники, которые приходилось заменять, чтобы не заедало каретку.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы была проанализирована предметная область, выбраны основные комплектующие для 3Д принтера, спроектирована механика поворотного стола, доработана рама принтера “Voron 2.4”, а также произведен расчет напряжений и смещений в различных деталях.

Созданы сборочные чертежи различных частей сборки принтера. Создана спецификация деталей к сборочным чертежам. (Приложение А)

Были куплены и напечатаны все комплектующие для принтера, после чего была осуществлена сборка принтера.

В ближайшем будущем планируется испытание принтера. Печать будет производиться с максимальным наклоном 45 град., после чего будет производиться модернизация печатающей головы, а именно ее удлинение, чтобы увеличить градусы наклона стола. Далее планируется полный редизайн деталей принтера для возможного коммерческого использования.

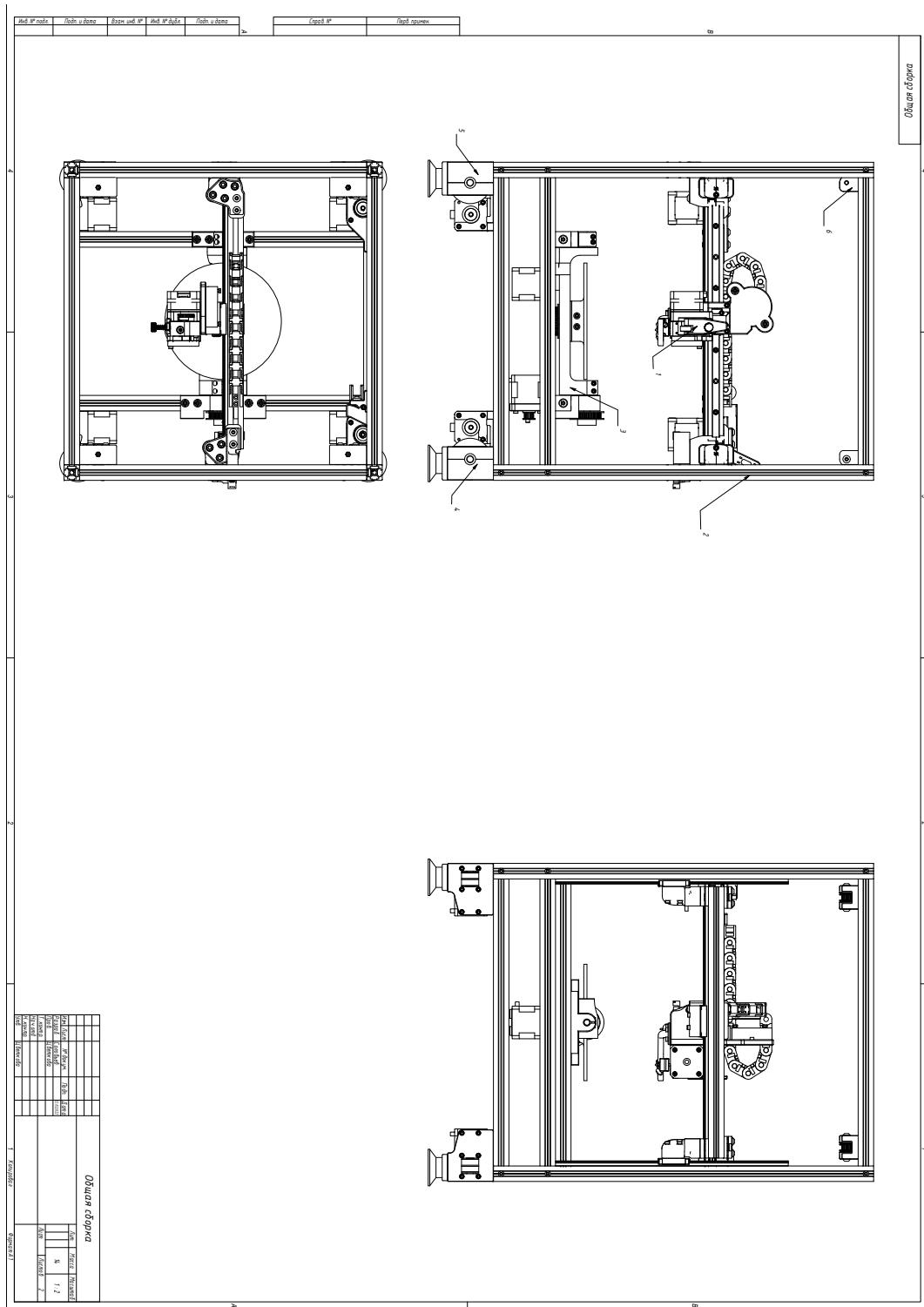
Также в принтере планируется создание механизма смены фильтра для автоматизированной цветной печати или для автоматической смены вида пластика (например для удаленной печати).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. High-performance nonlinear feedback control of a permanent magnet stepper motor / Bodson Marc, Chiasson John N, Novotnak Robert T, and Rekowski Ronald B // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 1993. — Vol. 1, no. 1. — P. 5–14.
2. Имитационное моделирование механизма наплавления пластмасс в аддитивных технологиях / Гурский НН, Скачек ВА, Скачек АВ и Скудняков ЮА // Системный анализ и прикладная информатика. — 2016. — № 4. — С. 25–30.
3. LTD. ETHEREAL MACHINES PVT. Advanced Manufacturing for Everyone. — 2012. — Режим доступа: <https://etherealmachines.com/> (дата обращения: 18.05.2022).
4. Ivanov. Mike. epit3d. — 2022. — Режим доступа: <https://github.com/epit3d> (дата обращения: 18.05.2022).
5. Grutle Øyvind Kallevik. 5-axis 3D Printer : Master's thesis. — 2015.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### ЧЕРТЕЖИ



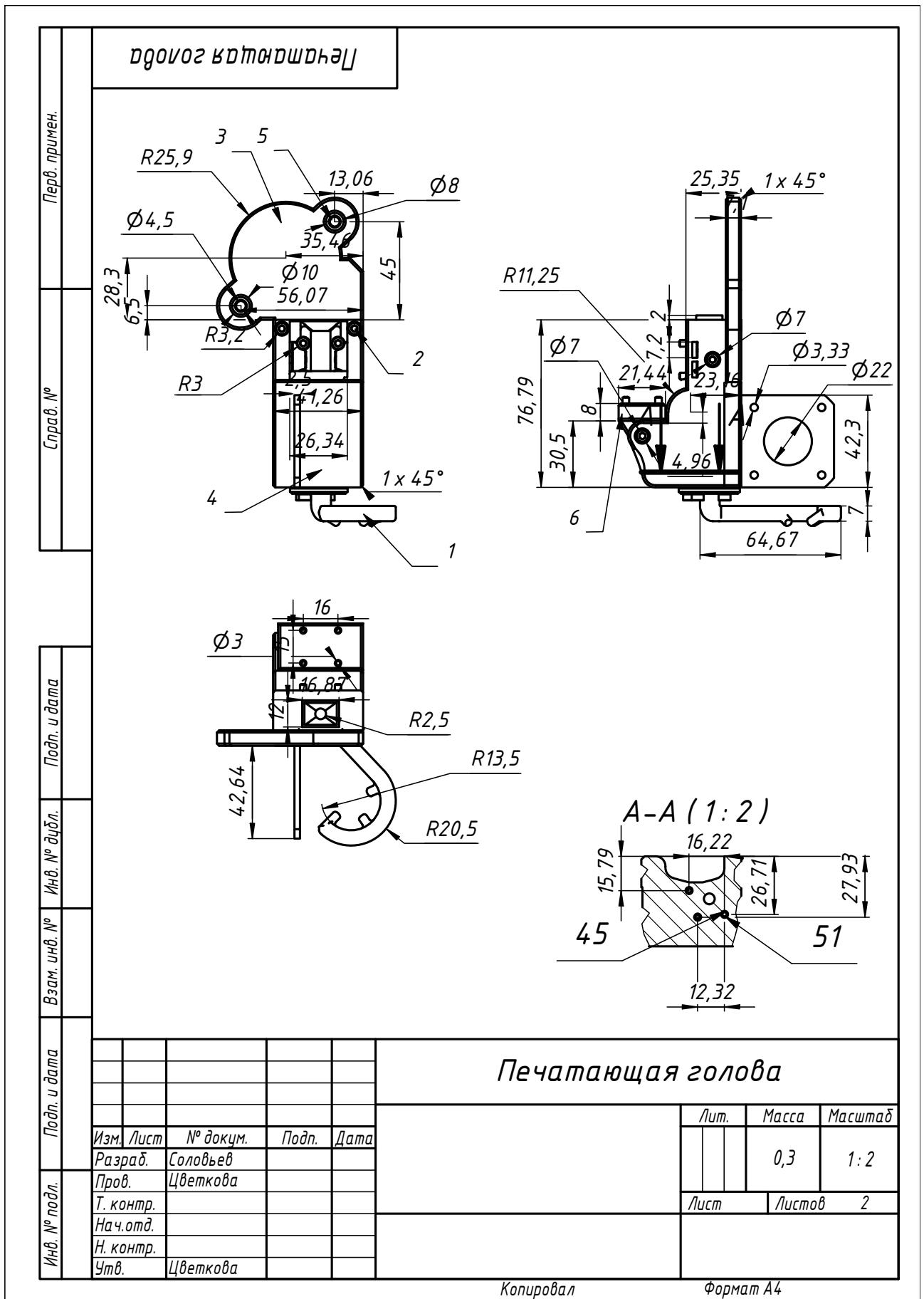
Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<i>Документация</i>		
			<i>Общая сборка</i>	<i>Сборочный чертеж</i>	1	
				<i>Комплексы</i>		
		1		<i>Портал</i>	1	
		2		<i>Рама</i>	1	
		3		<i>Поворотный стол</i>	1	
		4		<i>привод оси z 1</i>	2	
		5		<i>Привод оси z 2</i>	2	
		6		<i>Верхний шкив оси z</i>	4	

## *Общая сборка*

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Соловьев			22.05.2022		14	1:2
Проб.	Цветкова						
Т. контр.					Лист	Листов	2
Нач.отд.							
Н. контр.							
Утв.	Цветкова						

Копировано

## Формат А4



Копироваль

Формат А4

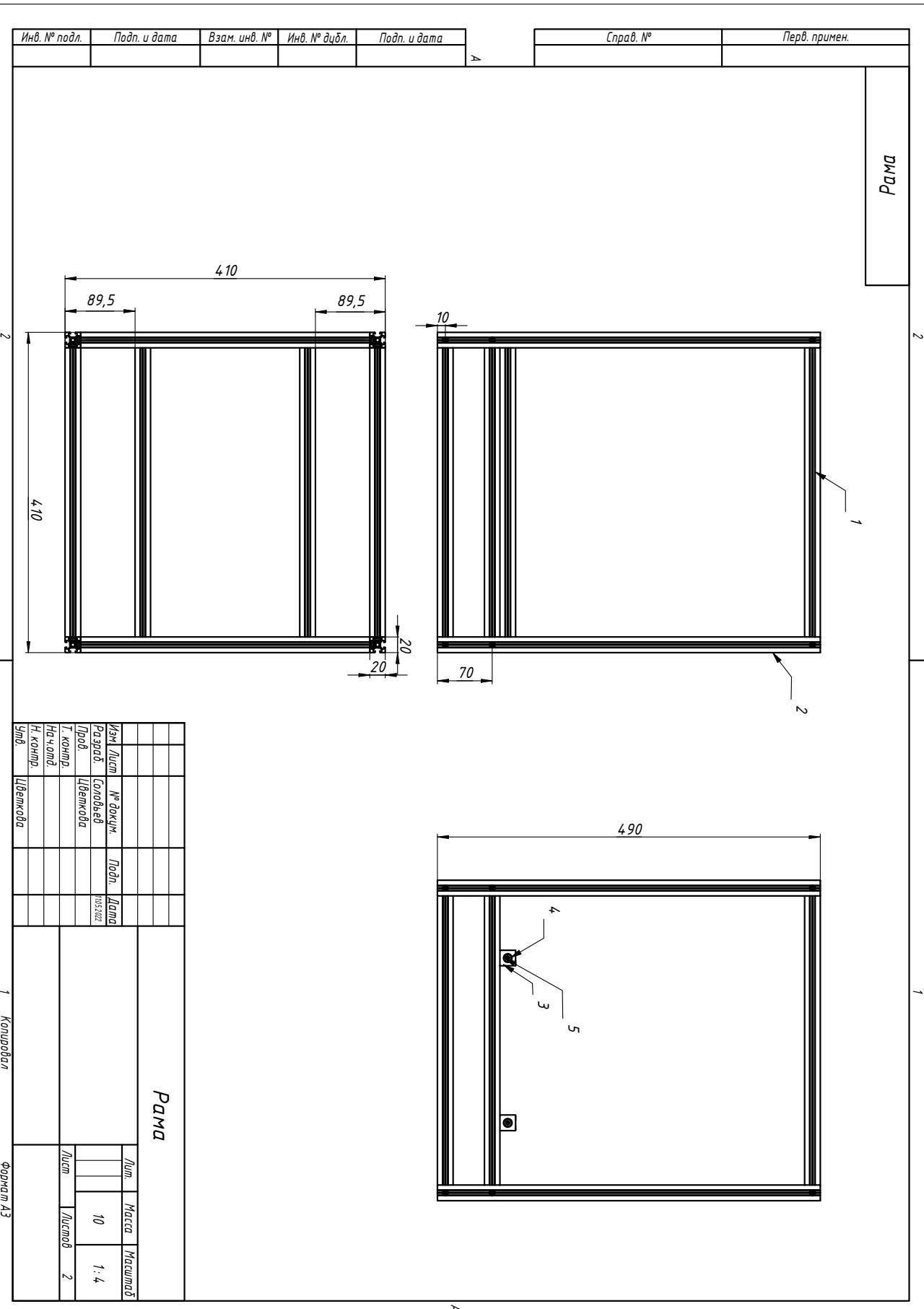
Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<i>Документация</i>		
			<i>Общая сборка</i>	<i>Сборочный чертеж</i>	1	
				<i>Сборочные единицы</i>		
		1		<i>Канал обдува модели</i>	1	
		2		<i>Болт М3 Зх8 с цилиндрической головой для шестигранника</i>	8	
		3		<i>Держатель турбинного вентилятора</i>	1	
		4		<i>Корпус печатающей головы</i>	1	
		5		<i>Болт М4x14</i>	2	
		6		<i>Стыковочный узел с кареткой оси х</i>	1	

## *Печатающая голова*

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Соловьев					0,3	1:2
Проф.	Цветкова						
Т. контр.					Лист	Листов	2
Нач.отд.							
Н. контр.							
Утв.	Цветкова						

Копировано

## Формат А4



Рана

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Соловьев			11.05.2022		10	1: 4
Проб.	Цветкова						
Т. контр.					Лист	Листов	2
Нач.отд.							
Н. контр.							
Утв.	Цветкова						

Копировано

Формат А4

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### ЛИСТИНГИ

#### Листинг Б.1 — Константы для моделирования шагового двигателя

```
1 R = 0.55;
2 L = 1.5e-3;
3 K_m = 0.19;
4 FullStepSize = 1.8*pi/180;
5 N_r = pi/2*1/FullStepSize
6 T_d = 0;
7 R_m = inf;
8 B = 1e-02;
9 J = 4.5e-05;
10 theta_init = -0.9/180*pi
11 init_angle = -0.9;
```

#### Листинг Б.2 — Код функции “Matlab Function”

```
1 function omega_dot = fcn(T_e, J, B, omega)
2 omega_dot = T_e/J-B*omega/J;
```

#### Листинг Б.3 — Код функции “Matlab Function 1”

```
1 function i_A_dot = fcn(nu_A, e_A, i_A, R, L)
2 i_A_dot = (nu_A-R*i_A-e_A)/L;
```

#### Листинг Б.4 — Код функции “Matlab Function 2”

```
1 function i_B_dot = fcn(nu_B, e_B, i_B, R, L)
2 i_B_dot = (nu_B-R*i_B-e_B)/L;
```

#### Листинг Б.5 — Код функции “Matlab Function 3”

```
1 function T_e = fcn(i_A, e_A, Theta, i_B, e_B, K_m, R_m, N_r, T_d)
2 T_e = -K_m*(i_A-e_A/R_m)*sin(N_r*Theta) +
3 +K_m*(i_B-e_B/R_m)*cos(N_r*Theta)-T_d*sin(4*N_r*Theta);
```

#### Листинг Б.6 — Код функции eA

```
1 function e_A = fcn(omega, Theta, K_m, N_r)
2 e_A = -K_m*omega*sin(N_r*Theta);
```

#### Листинг Б.7 — Код функции eB

```
1 function e_B = fcn(omega, Theta, K_m, N_r)
2 e_B = K_m*omega*sin(N_r*Theta);
```