

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та  
робототехніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)

Розробка системи багатокольорового FDM/FFF 3D друку

(тема)

Виконав студент 4 курсу,  
групи АКТСІ-20-3  
Жвакін Євгеній Олексійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальності 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо-професійна  
Освітня програма СІ  
(назва)

Керівник доц. каф. КІТАР Разумов-Фризюк Є.А.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав та не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

03.06.2024

Жвакін Є.О.

## ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ  
 Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР  
 Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський)  
 Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
 Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна  
 Освітня програма \_\_\_\_\_ Системна інженерія  
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Жвакін Є.О.  
(шифр і назва)

1. Тема роботи: \_\_\_\_\_ Розробка системи багатокольорового FDM/FFF 3D друку

Затверджена наказом університету від \_\_\_\_\_ №542Ст від 03.06.2024

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 21.06.2024р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Кількість кольорів/матеріалів одночасного друку 5; 3.2 Мінімізація втрат матеріалу при заміні філаменту;

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз технічного завдання; 4.3 Аналіз технологій FDM/FFF; 4.4 Аналіз конструкції сопла 3D принтера; 4.5 Аналіз видів систем 3D друку кількома матеріалами; 4.6 Розробка конструкції системи tool changer; 4.7 Аналіз аналогічної конструкції; 4.8 Вибір механізму фіксації; 4.9 Розробка конструкції системи Tool Changer; 4.10 Розробка блоку каретки; 4.11 Розробка блоку екструдеру; 4.12 Розробка тримача екструдеру; 4.13 Принцип роботи розробленої системи Tool Changer; 4.12 Симуляція механічних навантажень на систему tool changer; 4.13 Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(\*.ppt) формату А4 –15 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по-батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технології FDM/FFF 3D друку	05.04.2024-11.04.2024	виконано
2	Аналіз видів систем 3D друку кількома матеріалами	12.04.2024-18.04.2024	виконано
3	Аналіз аналогічних конструкцій	19.04.2024-23.04.2024	виконано
4	Вибір системи контактування екструдера і каретки	25.04.2024-30.04.2024	виконано
5	Розробка 3D моделі системи Tool Changer	01.05.2024-12.05.2024	виконано
6	Розробка блоку каретки	13.05.2024-23.05.2024	виконано
7	Розробка блоку екструдера	24.05.2024-02.06.2024	виконано
8	Розробка тримача екструдера	02.06.2024-06.06.2024	виконано
9	Симуляція механічних навантажень	07.06.2024-08.06.2024	виконано

Дата видачі завдання 3 квітня 2024р.

Студент \_\_\_\_\_ Жвакін Є.О.  
 (підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Разумов-Фризюк Є.А.  
 (підпис) (прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 76 с., 55 рис., 11 джерел.

3D ДРУК, 3D МОДЕЛІ, 3D ПРИНТЕР, IDEX, TOOL CHANGER, ЧПУ  
ВЕРСТАТ, СИМУЛЯЦІЯ МЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.

Метою роботи є розробка системи багатокольорового 3D друку.

Об'єктом роботи є технологія екструзійного 3D друку.

Предметом роботи є FFF друк кількома матеріалами.

В даній кваліфікаційній роботі проаналізовано технології одночасного 3D друку кількома матеріалами. Запропановано конструкцію системи із змінними екструдерами. Розроблено 3D модель системи, що містить блок каретки, блок екструдеру, тримач екструдеру. Проведено симуляцію механічних навантажень, що емулюють поведінку систему при 3D друці.

## **ABSTRACT**

Explanatory note: 76 pages, 55 figures, 11 sources.

**3D PRINTING, 3D MODELS, 3D PRINTER, IDEX, TOOL CHANGER, CNC MACHINE, SIMULATION OF MECHANICAL LOADS.**

The purpose of the work is to develop a multi-color 3D printing system.

The object of the work is the technology of extrusion 3D printing.

The subject of the work is FFF printing of several materials.

This qualification paper analyzes the technologies of simultaneous 3D printing with several materials. The design of the system with replaceable extruders is proposed. A 3D model of the system containing the carriage block, the extruder block, and the extruder holder was developed. A simulation of mechanical loads was carried out, emulating the behavior of the system during 3D printing.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз технічного завдання.....	11
1.1 Аналіз технологій FDM/FFF .....	11
1.2 Аналіз конструкції сопла 3D принтера.....	12
1.3 Аналіз видів систем 3D друку кількома матеріалами.....	16
1.3.1 Паралельні сопла .....	16
1.3.2 Екструдер із розгалужувачем .....	17
1.3.3 Екструдери, що змішують .....	18
1.3.4 Сопла, що рухаються .....	20
1.3.5 Незалежні екструдери .....	21
1.3.6 Зовнішні перемикачі філаменту .....	22
1.3.7 Екструдери, що перемикаються .....	24
2 Аналіз системи Tool Changer .....	26
2.1 Аналіз аналогічної конструкції.....	26
2.2 Вибір механізму фіксації.....	29
3 Розробка Конструкції Системи Tool Changer.....	32
3.1 Розробка блоку каретки.....	32
3.2. Розробка блоку екструдеру .....	38
3.3 Розробка тримача екструдеру .....	48
3.4 Принцип роботи розробленої системи Tool Changer .....	51
4 Симуляція механічних навантажень на систему Tool Changer.....	56
5 Розробка моделі управління кроковим двигуном системи подачі пластику.....	62
6 Охорона праці.....	66
Висновки .....	73
Перелік джерел та посилань.....	74
Додаток А. ....	76

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДСТУ – державний стандарт України;

ЧПУ – числове програмне управління;

FDM – fused deposition modeling;

FFF – fused filament fabrication;

IDEX – Independent Double Extruder.

## ВСТУП

Аддитивні технології, зокрема технології FDM/FFF з кожним роком стають все більш популярним. Якщо раніше 3D друк використовувався для прототипування деталей на виробництві, то зараз завдяки цим технологіям вже виконується серійне виробництво деталей. Крім того все частіше можна зустріти 3D принтер вдома або не великих фірмах. Справа в тому, що поперше принтери і витратні матеріали стають все більш дешевими, по-друге у свідомості людей 3D друк з екзотичної технології стає більш звичайної і по-третє постійно розширюються можливості сучасних 3D принтерів.

Дуже важливим етапом популяризації 3D принтерів як у бізнесі, так і вдома стала можливість одночасного друку декількома матеріалами або кольорами. У випадку промислового друку це дає можливість виготовляти деталі, що містять різні матеріали в єдиному виробничому циклі. Так наприклад можливо друкувати:

- основним матеріалом, що має невисоку вартість, це фактично «наповнювач», який дозволить значно зменшити собівартість виробу;
- матеріалом підтримки, для побудову спеціальних технологічних елементів – підтримок;
- армуючим матеріалом, що дозволить зробити армуючу структуру для збільшення міцності виробу;
- еластичними матеріалами, що дозволять робити рухливі міжз'єднання між окремими жорсткими частинами деталі;
- хімічностійким матеріалом, який буде захищати основну для основного матеріалу деталі;
- декоративним матеріалом, що дозволить покращити зовнішній вигляд виробу;
- іншими матеріалами із специфічними властивостями, зміна твердості, струмопровідності, ваги та інше.

Ще більше можливостей друк кільком матеріалами надає у випадку виробництва декоративних речей. Перш за все це можливість багатокольорового друку. Таким чином з'являється можливість друку багатокольорових виробів з одного або різних матеріалів.

Таким чином розробка системи багатокольорового FDM/FFF 3D друку є вкрай важливою та актуальною задачею.

Об'єктом роботи є технологія 3D друку FDM/FFF.

Предметом роботи є системи одночасного 3D друку кількома матеріалами.

Метою роботи є розробка конструкції 3D друку п'ятьма матеріалами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати конструкції існуючих систем друку кількома матеріалами;
- обрати або розробити систему заміни філаменту;
- розробити 3D модель системи багатокольорового 3D друку;
- провести симуляцію механічних навантажень на систему, що розроблено.

Дана кваліфікаційна робота була виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], а також, керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3].

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

## 1.1 Аналіз технологій FDM/FFF

Технологія FDM є однією з перших адитивних технологій виробництва. FDM (fused deposition modeling) з англійської моделювання методом пошарового наплавлення (рисунок 1.1). Ця технологія була винайдена С. Скоттом Крапом наприкінці 1980-х років і вийшла на комерційний ринок у 1990 році і є торговою маркою компанії Stratasys [4].

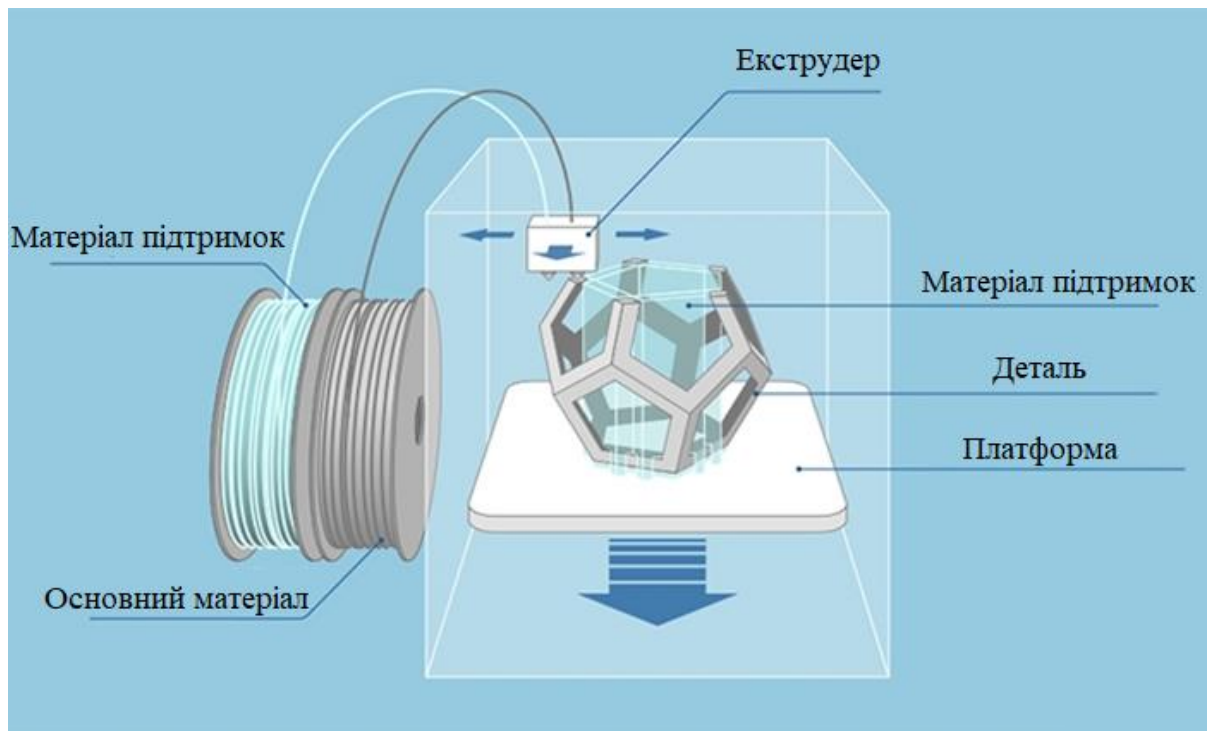


Рисунок 1.1 – Технологія FDM [4]

Суть технології полягає у пошаровій екструзії термопластичних пластиків, сформованих у вигляді довгого прутка невеликого діаметра, який попередньо нагрівається до температури переходу у в'язко-текучий стан у спеціальній конструкції – екструдері. Екструдер переміщується пошарово у тривимірному просторі відносно платформи, дозуючи у різних координатах

необхідну кількість матеріалу. Таким чином шар за шаром відбувається побудова необхідної деталі.

Матеріал нашаровується сам на себе, при цьому він сплавляється. Але у випадку коли новий шар матеріалу не має під собою попередніх шарів, необхідно будувати спеціальну технологічну конструкцію, що зветься «підтримка». Такі підтримки можуть будуватися з того самого матеріалу, що і основний. Або із спеціального матеріалу, що потім видаляється хімічно.

Через те, що технологія FDM була запатентована компанію Stratasys, її використання без придбання ліцензії було неможливо. Тому ентузіасти 3D друку з проєкту RepRap подали власний патент, який дрібними деталями відрізнявся від технології FDM. Нова технологія отримала назву FFF (fused filament fabrication) - виробництво методом наплавлення ниток. С того часу почався бурхливий розвиток 3D друку у світі як серед любителів DIY, так і серед компаній.

## 1.2 Аналіз конструкції сопла 3D принтера

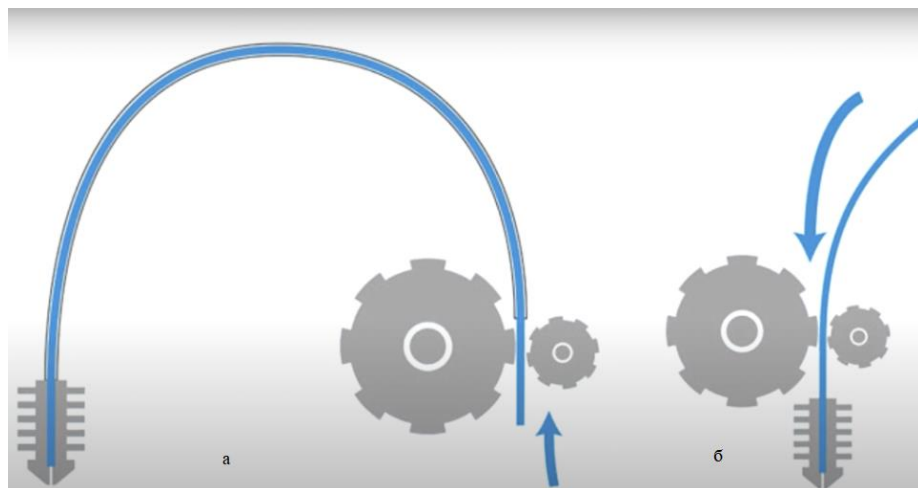
Для подальшого аналізу видів багатокольорового друку обов'язково необхідно провести аналіз екструдерів, що використовуються у 3D друці. Не дивлячись на те, що вони можуть мати доволі різний вигляд, відрізнятися матеріалами, що використовуються, основні компоненти, з яких складається екструдер, однакові [5].

Екструдер складається з двох умовних частин: hot-end та cold-end. Цей поділ є дійсно умовним і різні спеціалісти різним чином поділяють компоненти екструдеру за приналежністю до hot-end та cold-end. Далі буде наведено найбільш поширений серед 3D друкарів погляд.

До hot-end, або «гарячої» частини екструдера, відносять ті елементи, що забезпечують термічний перехід пластикового філаменту з твердої фази у

в'язко-текучу: сопло, термобар'єр, радіатор, вентилятор обдуву радіатору. До cold-end, або «холодної» частини екструдера, відносять механізм подачі та кроковий двигун, які дозують пластик при екструзії.

За взаємним розташуванням hot-end та cold-end екструдери поділяють на прямі, або direct, та рознесені, або bowden (рисунок 1.2). У першому випадку і hot-end, і cold-end розташовані поруч на каретці екструдера. У другому випадку hot-end – на каретці екструдера, а cold-end на корпусі принтера, а поєднуються вони один з іншим завдяки фторопластовій трубці, скрізь яку проходить філамент.



а – bowden; б – direct.

Рисунок 1.2 – Типи екструдерів

Direct екструдер має наступні переваги:

- можливість і легкість роботи із гнучкими філаментами, такими як TPU та Elasthan;
- легкість налаштування «відкатів» філаменту;
- відсутність застрягань філаменту у трубці, що поєднує hot-end та cold-end.

Але разом із перевагами є і недоліки:

- більша вага каретки екструдеру через те, що кроковий двигун та механізм знаходяться на ній;

- менші швидкості та прискорення друку, так як збільшена маса каретки та збільшено її інерційність.

У bowden екструдери переваги та недоліки міняються місцями.

Переваги:

- менша вага каретки екструдеру через те, що кроковий двигун та механізм знаходяться на корпусі;

- більші швидкості та прискорення друку, так як зменшено масу каретки та зменшено її інерційність.

Недоліки:

- складність, а іноді і неможливість роботи із гнучкими філаментами, такими як TPU та Elasthan, особливо з малою твердістю за Шором;

- більша важкість налаштування «відкатів» філаменту;

- можливість застрягань філаменту у трубці, що поєднує hot-end та cold-end, а при великій довжині трубки – важкість проштовхування.

Також необхідно розглянути складові частини екструдера. Найпростіше це зробити на прикладі екструдеру V6 від компанії E3D (рисунок 1.3). По-перше цей екструдер є найбільш розповсюдженим в наш час, по-друге все компоненти в ньому є чітко вираженими. Всі інші екструдери мають ті самі компоненти, але вони можуть мати змінений вигляд [3].

Сопло – це деталь, що має отвір діаметром від 0,2 до 1,2 мм. Саме сопло формує в'язкий пруток, що нашаровує елементи деталі. В залежності від діаметру отвору сопла збільшується чи зменшується швидкість друку та можлива деталізація моделі (роздільна здатність принтера у горизонтальній площині). Сопла зазвичай виготовляють із латуні чи сталі, іноді для філаментів із абразивним наповнювачем використовують сопла із керамічною або рубіновою форсункою.

Блок нагріву – металева деталь (найчастіше алюміній, бронза, латунь), яка використовується як концентратор термічної енергії, яка використовується на розплавлення філаменту. У блоці нагріву фіксується термістр – датчик температури та елемент нагріву – керамічний перетворювач електричної енергії в термічну.

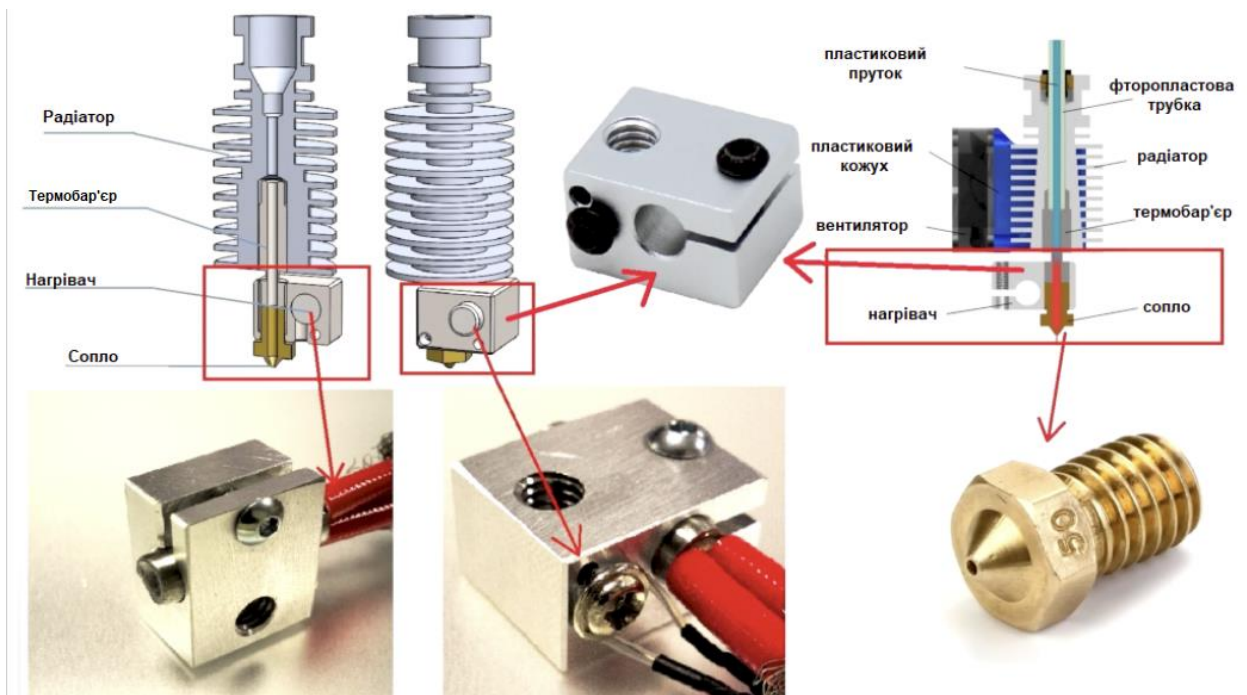


Рисунок 1.3 – Екструдер E3D V6

Термобар'єр – елемент, що перешкоджає розповсюдженню високої температури в блоці нагріву. Якщо температура не буде обмеженою, то філамент розплавиться на великій довжині і кроковий двигун подачі не зможе проштовхувати пластик в сопло. Термобар'єрів існує велика кількість різновидів: цільнометалеві, наскрізні, з фторопластовою трубкою, з керамічною вставкою та інш.

Радіатор та вентилятор обдуву відводять зайву температуру, що може «пройти» скрізь термобар'єр. Таким чином в блоці нагріву забезпечується

температура переходу пластика у рідкий стан, а в радіаторі – температура для зберігання прутка філаменту у твердому стані.

### 1.3 Аналіз видів систем 3D друку кількома матеріалами

#### 1.3.1 Паралельні сопла

Це найпростіший з можливих варіантів багатокольорового друку. У такому варіанті на каретці екструдеру знаходиться або два незалежних hot-end'а або два hot-end'а об'єднаних одним радіатором (рисунок 1.4) [6].

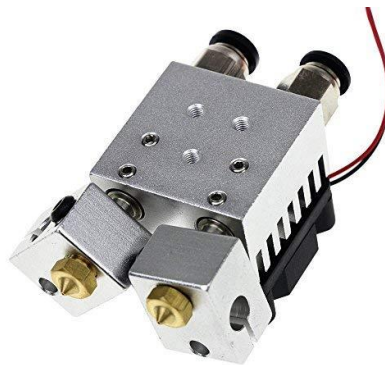


Рисунок 1.4 – Екструдер з паралельними соплами

Кількість екструдерів, що поєднуються таким чином як правило варіюються від 2 до 4.

До переваг такого варіанту багатокольорового друку можна віднести:

- можливість установки майже на будь-який варіант принтеру;
- простоту налаштування;
- простоту експлуатації;
- відсутність збільшення витрат пластику при друці кількома кольорами.

Але разом із тим є і велика кількість недоліків:

– важкість або неможливість організації direct подачі через те що входи каналів філаменту знаходяться занадто близько один до одного (існують екструдери що дозволяють direct подачу);

– сопла в процесі друку знаходяться на одній висоті і в процесі друку неактивне сопло може чіпляти модель;

– з неактивного сопла в процесі друку може підтікати пластик і потрапляти на модель;

– через збільшений розмір hot-end'у або кілька hot-end'ів збільшується вага екструдеру.

– кількість кольорів або матеріалів якими відбувається одночасний друк як правило обмежуються двома.

Існуючі недоліки переважають переваги, крім того при друці різними матеріалами велика вірогідність виникнення браку.

### 1.3.2 Екструдер із розгалужувачем

Цей варіант багатокольорового друку ще має англійську назву Single Nozzle, тобто «одне сопло». Суть технології полягає у використанні екструдера із одним соплом і кількома входами пластикового філаменту (рисунок 1.5) [7].



Рисунок 1.5 – Екструдер із розгалужувачем

Кількість таких входів пластику може варіюватись як правило від двох до 6. Іноді можна зустріти перероблені звичайні сопла, ті самі E3D V6 на які друкуються багатоканальні перехідники. Таким чином друк відбувається друк через єдине сопло, при заміні пластика попередній філамент робить ретрак (втягування філаменту) і на його місце подається новий філамент. Але у соплі залишаються частинки попереднього пластика, який потрібно продавити скрізь сопло. Для того щоб продавити попередній пластик на столі робочого простору друкуються спеціальна технологічна конструкція – «чорнова башта».

До переваг даного типу багатокольорового друку відноситься:

- невеликі розміри hot-end'у;
- ідеальна геометрична сумісність друку кількома пластиками, всі кольори або матеріали виходять з одного сопла;
- можливість установки майже на будь-який варіант принтеру;
- можливість друку багатьма кольорами

До недоліків слід віднести:

- зайві витрати філаменту, які викликані необхідністю регулярного продавлення попереднього пластика при друці чорнової башти;
- витрати часу на продавлення попереднього пластику;
- важкість або неможливість організації direct подачі через те що входи каналів філаменту знаходяться занадто близько один до одного.

Даний варіант багатокольорового друку вимагає значні зайві витрати філаменту на очищення сопла, при чому ці витрати зростають із збільшенням кількості кольорів, які одночасно використовуються.

### 1.3.3 Екструдери, що змішують

Екструдери, що змішують, або *Mixing extruders*, дуже схожі на попередній варіант багатокольорового друку. Тобто в екструдері є єдине сопло і кілька вхідних каналів філаменту. Кількість цих каналів як правило

варіюється від трьох до семи. Відмінністю є те, що канали подачі перетинаються не в радіаторі, а в нагрівальному блоці. І таким чином можливо подавати одночасно кілька матеріалів, змішуючи їх. Таким чином можна отримати дійсно багатокольоровий друк, якщо використовувати кольорову схему CMY (Cyan, Magenta, Yellow) - блакитний, пурпуровий та жовтий, або RGB (Red, Green, Blue) — червоний, зелений, синій. Тобто змінюючи пропорційне відношення трьох різних філаментів можна отримати будь-які кольори та відтінки. Через особливості кольорових схем, найбільш популярною кількістю каналів філаменту є три. На рисунку 1.6 наведено один із найбільш популярних екструдерів - Diamond nozzle [8].



Рисунок 1.6 – Diamond nozzle

До переваг екструдери, що змішують можна віднести:

- можливість дійсно багатокольорового друку;
- ідеальна геометрична сумісність друку кількома пластиками, всі кольори або матеріали виходять з одного сопла;

До недоліків можна віднести:

- неможливість друкувати різними матеріалами;
- достатньо великі розміри екструдеру як наслідок вага, інерційність і зменшення швидкостей і прискорень;
- необхідність високої однорідності крокових двигунів, налаштувань драйверів крокових двигунів;
- необхідність високої якості філаменту, збереження діаметра по всій довжині;
- можливість зворотнього потоку рідкого пластику по каналах, швидкість подачі по яким менше ніж на інших.

Дана технологія 3D друку є досить специфічною і не дає змоги друкувати різними матеріалами.

#### 1.3.4 Сопла, що рухаються

Сопла що рухаються це двокольоровий друк, або друк двома матеріалами при якому друк відбувається по чергово через два різних сопла, як і у випадку із паралельними соплами. Даний тип організації двокольорового друку має англomовну назву Switching nozzle. Але при цьому hot-end'и разом із соплами мають змогу рухатись вертикально один відносно іншого. Таким чином в зоні друку завжди знаходиться лише одне сопло (рисунок 1.7). Тип руху hot-end'ів може бути різний: це може бути лінійне переміщення або обертання навколо горизонтальної осі [9].

До переваг такого типу друку можна віднести:

- відсутність збільшення витрат пластику при друці кількома кольорами;

До недоліків можна віднести:

- складність конструкції;
- велика вага конструкції через наявність двох незалежних hot-end'ів та механізму їх переміщення;

- необхідність додаткового приводу для переміщення, як правило це серводвигун;
- можливість друку лише двома кольорами або матеріалами.



Рисунок 1.7 – Switching nozzle

Даний тип друку дозволяє друкувати лише двома кольорами або матеріалами

### 1.3.5 Незалежні екструдери

Даний тип друку носить назву IDEX або DualXCarriage. Сутність цього типу багатокольорового друку складається у тому, що на осі X одночасно знаходиться дві незалежні каретки, які дають змогу друкувати двома різними

кольорами або матеріалами, а також працювати у так званому дзеркальному режимі, коли друкується дві однакові деталі (рисунок 1.8) [4].



Рисунок 1.8 – Система IDEX

До переваг незалежних екструдерів можна віднести:

- можливість роботи у дзеркальному режимі;
- відсутність додаткових витрат філаменту при друці двома матеріалами.

До недоліків відносяться:

- складність конструкції принтеру;
- збільшена вага рухомої осі X, на якій знаходяться дві каретки з екструдерами та дві привідні системи;
- можливість друку лише двома кольорами або матеріалами.

Дана система друку вимагає розробки спеціальної конструкції принтеру, збільшеної осі X та дає змогу друкувати лише двома кольорами.

### 1.3.6 Зовнішні перемикачі філаменту

Це зовнішні системи перемикання філаменту, який подається скрізь звичайні сопла для одного пластику. Зазвичай вони виготовляються і

продаються виробниками принтерів як додаткове устаткування, що дає змогу здійснювати багатокольоровий друк [4, 9]. До найбільш відомих систем можна віднести:

- Multi Material Upgrade, Prusa;
- Mosaic Palette, універсальний прилад для будь-якого принтеру;
- AMS BL0004U, Bambulab (рисунок 1.9).

Це системи які працюють автоматично, і самі керують перемиканням філаментів як у випадку Mosaic Palette та AMS BL0004U, або прив'язані до плати керування принтером у випадку Multi Material Upgrade. Кількість кольорів варіюється від 6 до 16 в залежності від системи. Для багатокольорового друку також треба використовувати або чорнову башту, або прочищати сопло у спеціальному відсіку.

До переваг можна віднести:

- можливість придбання окремо від принтеру;
- ідеальна геометрична сумісність друку кількома пластиками, всі кольори або матеріали виходять з одного сопла;
- велика кількість філаментів, що одночасно використовується.



Рисунок 1.9 – AMS BL0004U, Bambulab

До недоліків відносяться:

- велика вартість;
- у більшості випадків вони працюють лише з принтерами конкретних моделей та виробників;
- дуже великі витрати на очищення сопла від попереднього пластику;
- дуже повільна заміна філаменту.

Через жорстку прив'язку до конкретної моделі принтера дана конструкція не відповідає технічному завданню.

### 1.3.7 Екструдери, що перемикаються

Дана система має англomовну назву Tool Changer і більше за все нагадує сучасні багатоінструментальні фрезені верстати з ЧПУ. В таких 3D принтерах існує декілька екструдерів, які у свою чергу не фіксуються жорстко на каретці, а приєднуються та від'єднуються до неї за допомогою спеціальних механізмів, що керуються системою управління [6].

Механізм приєднання та від'єднання може мати різну фізичну природу. В Tool Changer від компанії E3D, наприклад, відбувається механічна фіксація екструдеру (рисунок 1.10).

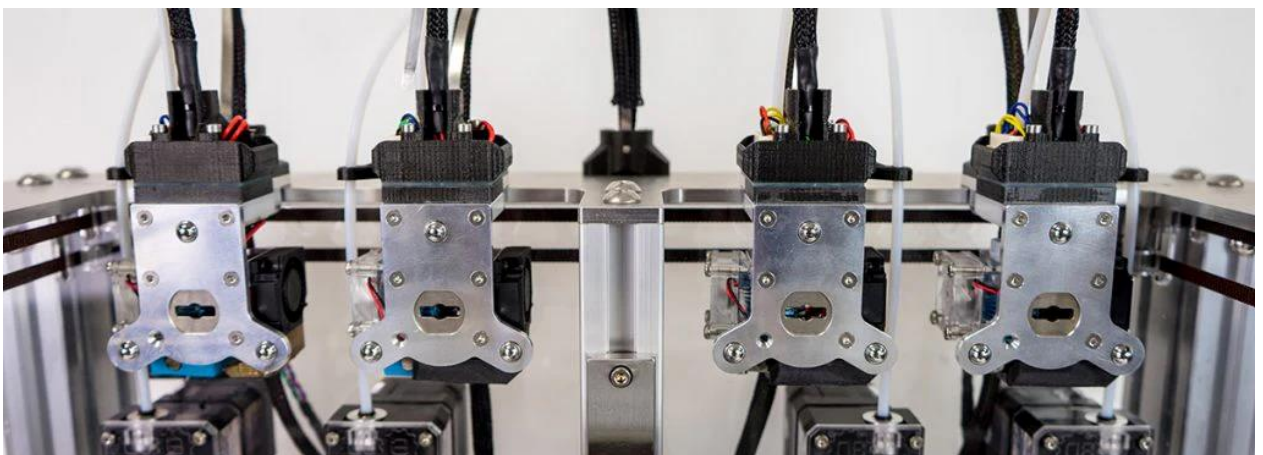


Рисунок 1.10 – Tool Changer від компанії E3D

Дана система багатокольорового друку має безліч переваг:

- можливість друку великою багатьма кольорами або матеріалами, кількість яких залежить від геометричних розмірів екструдерів і геометрії самого принтеру;

- відсутність додаткових витрат філаменту на багатокольоровий друк;

- дуже велика швидкість заміни кольору або матеріалу;

- можливість одночасного друку екструдерами із різним діаметром сопла;

- потенційно невелика вага екструдера;

- можливість друку як direct так і bowden екструдерами;

- можливість «апгрейду» існуючого принтеру.

Але присутні і недоліки;

- складне налаштування;

- велика вартість системи.

Саме ця система найбільше відповідає вимогам технічного завдання.

## 2 АНАЛІЗ СИСТЕМИ TOOL CHANGER

### 2.1 Аналіз аналогічної конструкції

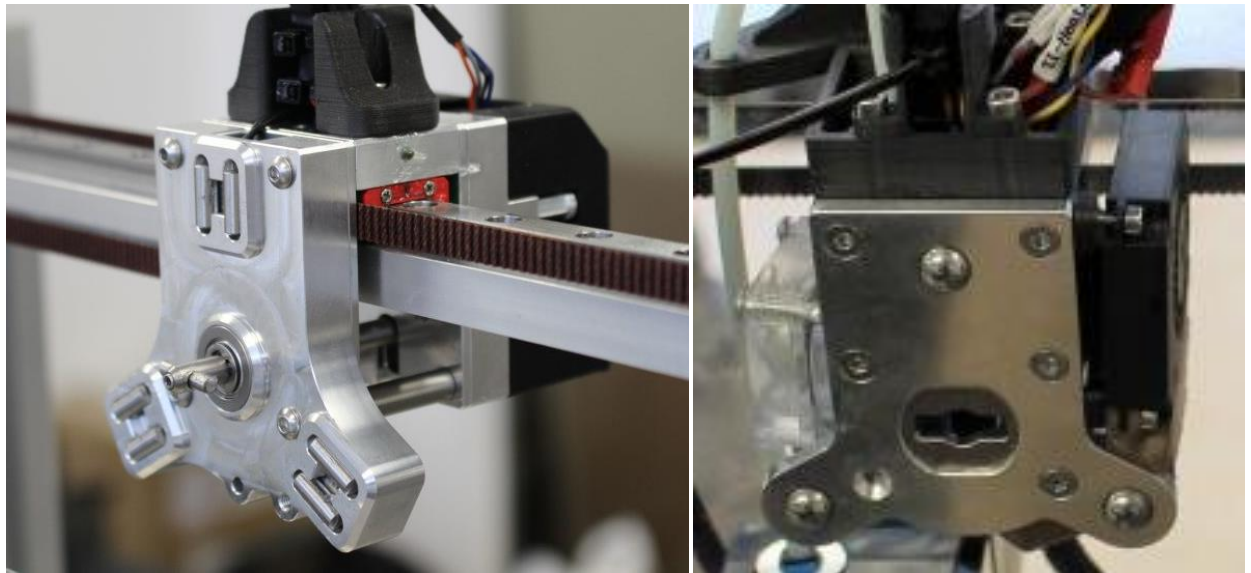
Перед початком власної системи екструдерів, що перемикаються необхідно провести аналіз існуючих аналогів. В системі Tool Changer існують окремі екструдери, що можуть приєднуватися до рухомої каретки, виконувати операції 3D друку та від'єднуватися від каретки. Головною задачею аналізу є саме методи перемикання екструдерів. Контакт екструдерів до каретки має бути:

- надійним, не має відбуватися мимовільного порушення контакту через високі швидкості, прискорення та вібрації в процесі 3D друку;
- жорстким, в процесі друку не має відбуватися зміщення екструдеру відносно каретки, так як це може викликати дефекти друкованих виробів;
- має легко автоматизуватися, так як 3D принтер є ЧПУ верстатом, то приєднання та від'єднання екструдеру має відбуватися завдяки стандартним командам G-коду та керуватися за допомогою стандартних плат керування, що використовуються у 3D принтерах.

Єдиною системою змінних екструдерів, що виготовляються серійно є Tool Changer від компанії E3D, про яку вже згадувалося у попередньому розділі. Існує багато модифікацій цієї системи, що розроблено інженерами у одиничному варіанті. Але всі вони мають той самий принцип контактування інструмента і рухомої каретки. Цей принцип контактування є механічним. Зображення каретки та екструдера системи Tool Changer наведено на рисунку 2.1 [10].

На каретці знаходиться кроковий двигун з валом на кінці якого знаходиться циліндр, перпендикулярний до осі валу. У блоці екструдеру знаходиться отвір. Система фіксації даної системи нагадує сувальдний ключ

та замкову щілину. Для з'єднання каретки та екструдера вал з циліндром проходить скрізь отвір після чого вал обертається завдяки кроковому двигуну і фіксує екструдер на каретці.



а

б

а – каретка, б – екструдер

Рисунок 2.1 – Tool Changer E3D

Для того щоб екструдер не обертася навколо валу на каретці та екструдерному блоці знаходяться елементи стиковки. На екструдері – три металеві кульки, а на каретці – три пари циліндрів.

До переваг такої системи слід віднести надійність контактування, яке не буде залежати від коливань напруги. Але разом із тим є велика кількість недоліків:

- велика вага, у системі використовується велика кількість металевих деталей, на каретці знаходиться кроковий двигун, який важить досить багато;
- необхідність високої точності виготовлення деталей та зборки системи.

DIY аналоги даної системи не мають істотної різниці, іноді зустрічаються пластикові деталі замість металевих, але разом із тим

втрачається надійність системи через рухливі пластикові елементи. Крім того кроковий двигун все одно знаходиться на каретці.

Окремо слід відмітити модифікацію у якій роковий двигун знаходиться на корпусі принтеру, а передача руху відбувається завдяки системі тросів та деталі-коромисла [11]. Така система зображена на рисунку 2.2.

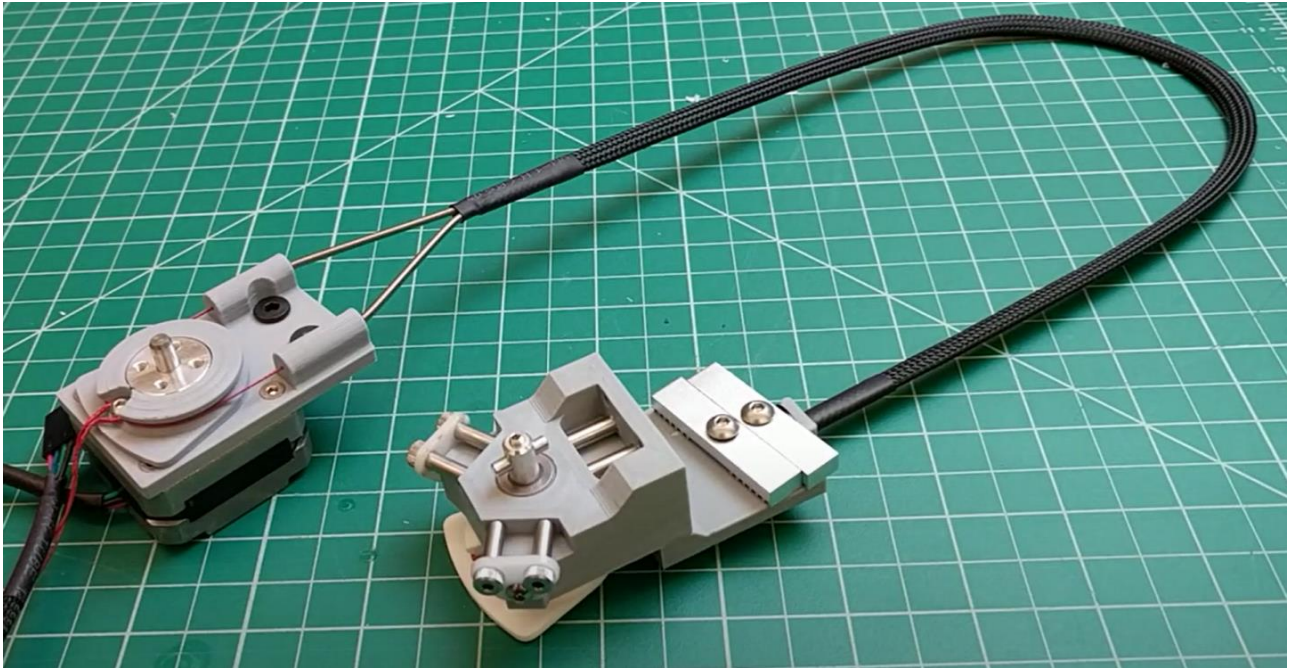


Рисунок 2.2 – Tool Changer з системою тросів

Система є більш легкою, але разом із тим менш надійною. Крім того додаткову вагу додає система тросів та трубок-рубашок до них.

Також у обох типів Tool Changer систем великим недоліком є відсутність інформації у платі керування принтером інформації про початкове положення циліндричного фіксуючого елемента на кінці оборотного валу. Таким чином якщо циліндричний фіксатор знаходиться не у початковому положенні то при включенні принтеру і контактування каретки з екструдером буди виникати помилка. Вирішити цю проблему додаванням датчика, наприклад оптичного кінцевого вимикача, але це ще більше ускладнить систему.

Таким чином прийняте рішення розробити власний механізм фіксації.

## 2.2 Вибір механізму фіксації

Вимогами до механізму фіксації екструдера є:

- простота автоматизації процесу захвату та фіксації;
- невелика маса каретки з механізмом фіксації та блоків екструдерів;
- проста конструкція;
- невисокі вимоги до точності виготовлення деталей.

Вирішено систему захвату та фіксації розробити на базі електричного магніту LS-P30/22. Даний тип магніту має живлення 12 В, тобто є можливість застосовувати живлення від стандартних блоків живлення 3D принтерів. Все сучасні FDM/FFF 3D принтери працюють від блоків живлення 12 В або 24 В. У разі необхідності існує електричний магніт LS-P30/22 із живленням 24 В.

Даний тип магнітів мають силу відриву 10 кг, що забезпечить високу міцність фіксації навіть при високих швидкостях та прискореннях. Також електромагніт LS-P30/22 мають невисоку вагу та розміри. Розміри електромагніту: діаметр 30 мм, висота 22 мм. Вага електромагніту 85 г. Робоча температура до 130 °С.



Рисунок 2.3 – Електромагніт LS-P30/22

Магніт необхідно встановити на каретку, на блоках екструдерів знаходяться сталеві диски діаметром 30 мм.

Електромагнітне контактування надійне, швидке та легко автоматизується. До недоліків можна віднести що у випадку вимкнення джерела енергії екструдер буде від'єднаний від каретки

Електромагніт забезпечить фіксацію по площині, для точного вертикального позиціонування необхідно передбачити додаткові направляючі.

Умовно систему Tool Changer можна поділити на три частини:

- каретка з фіксатором;
- блоки екструдерів;
- тримачі екструдерів.

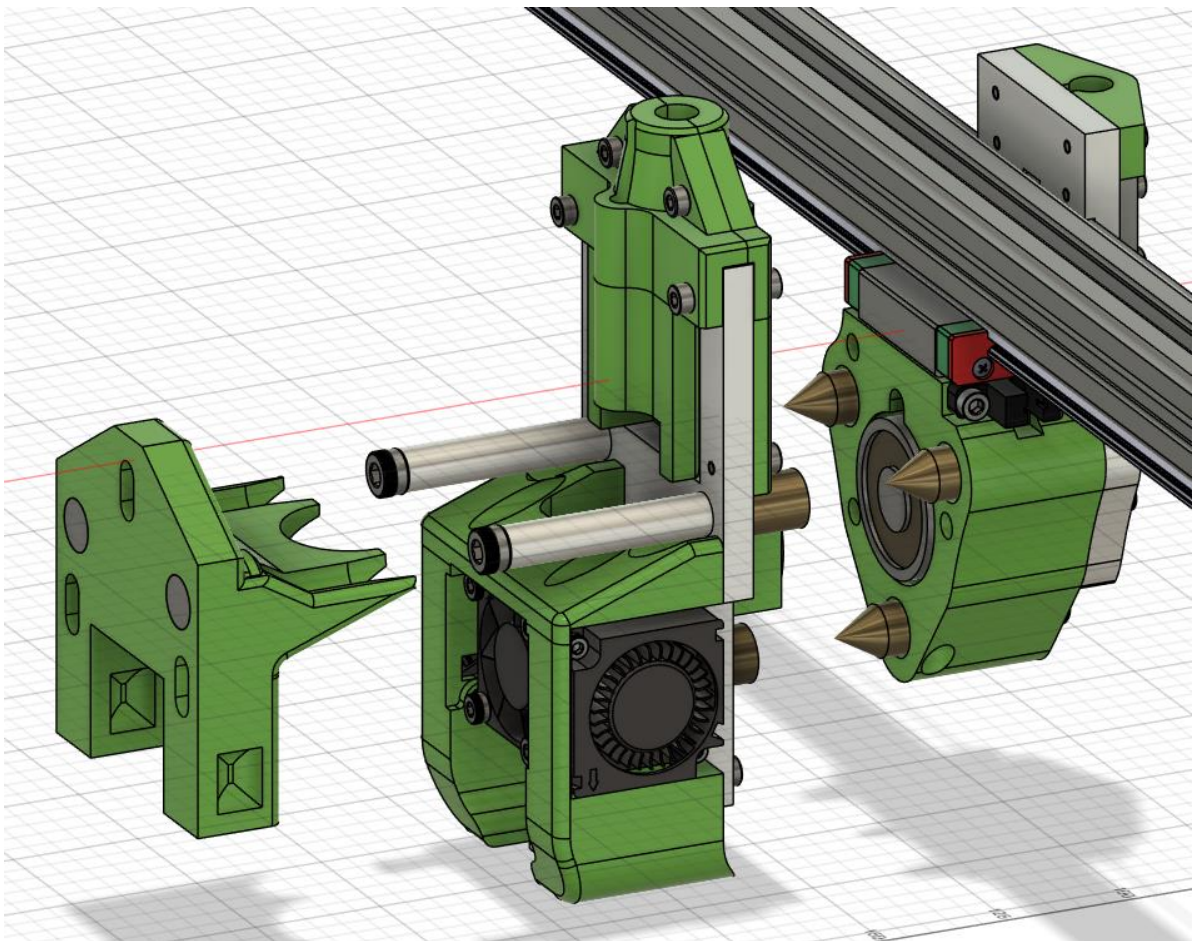


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд розробленої системи

Тримачі екструдерів необхідні для зберігання тих екструдерів, що в даний момент не підключені до каретки. Необхідно розробити кожен з цих систем.

Зовнішній вигляд системи, що розроблено наведено на рисунку 2.4.

Необхідно розглянути кожен із цих блоків.

## 3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМИ TOOL CHANGER

### 3.1 Розробка блоку каретки

Зовнішній вигляд блоку каретки наведено на рисунку 3.1 та 3.2.

Блок каретки кріпиться до каретки рейкової направляючої Hiwin MGN12H. Кріплення здійснюється чотирма гвинтами M3 din 912. До блока каретки також приєднується ремінь GT2 10 мм ремінної передачі 3D принтеру. На блоці каретки знаходиться також оптичний кінцевий вимикач осі X 3D принтеру.

Для точного вертикального позиціонування блока екструдеру на блоці каретки використовуються три конічних латунні елементи. Вони є підпружинені і можуть переміщуватись вздовж горизонтальної осі на невелику відстань. Це дасть змогу зменшити вимоги до точності виготовлення цих направляючих елементів та зборки системи Tool Changer. Матеріал конусних елементів обрано виходячи з вимог стійкості до ржавіння та механічної твердості.

До стандартних компонентів блока каретки відносяться:

- електромагніт LS-P30/22;
- оптичний кінцевий вимикач;
- гвинти та різьбові бонки;
- три пружини.

До нестандартних компонентів відноситься:

- корпус блока каретки;
- пластина фіксації ременю;
- направляюча гофрованого елемента захисту дротів;
- пластини затискання ременів;
- латунні конічні направляючі елементи.

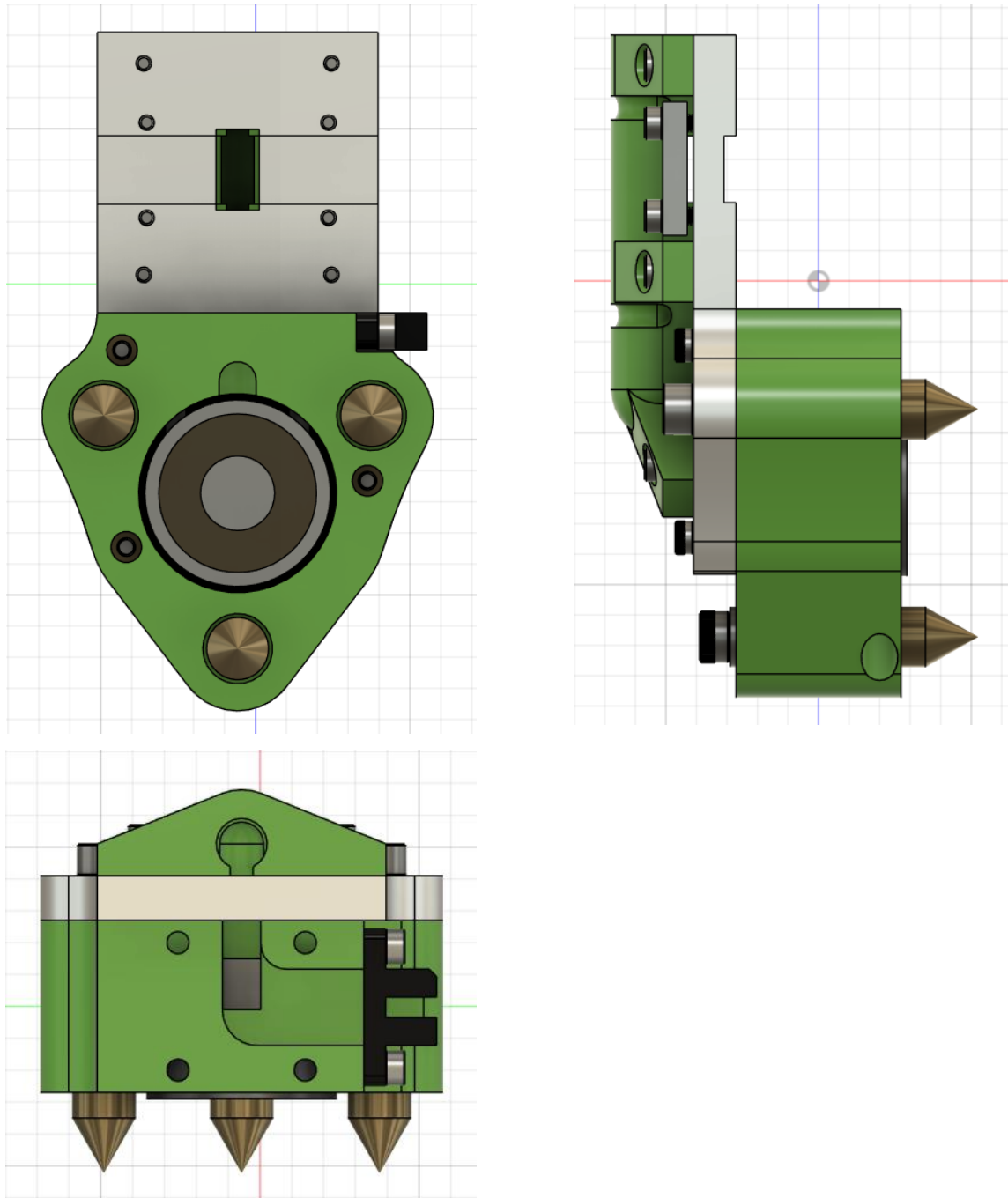


Рисунок 3.1 – Ескіз блока каретки

Основним елементом конструкції блока каретки, що поєднує всі інші, є корпус блока каретки. Для зменшення маси він виготовляється із термопласту соРЕТ, якій має високу міцність, твердість та термічну стійкість. Технологія виготовлення – 3D друк FFF. Для створення надійних різьбових з'єднань в

корпус блока каретки вплаваються латунні різьбові бонки М3. На рисунку 3.6 наведено ескіз корпусу блоку каретки.

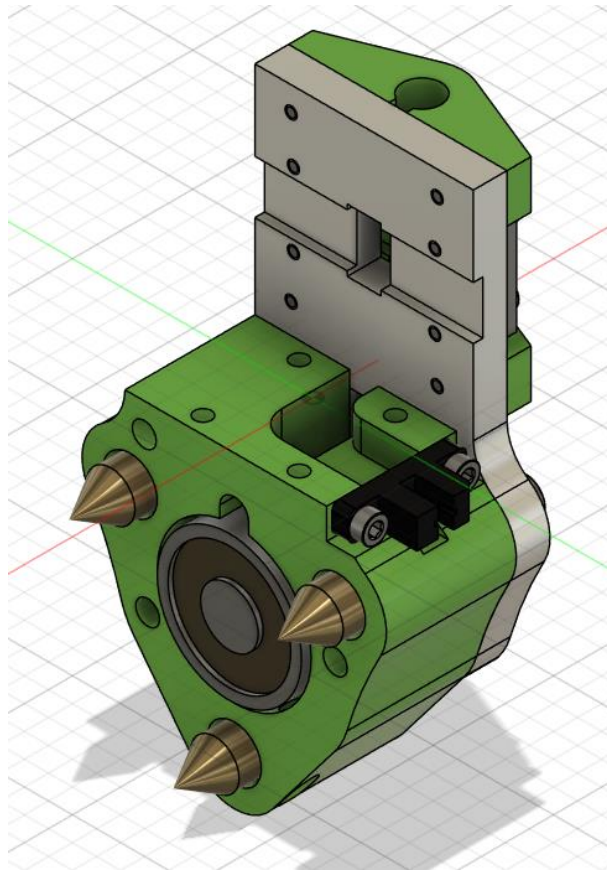


Рисунок 3.2 – Блок каретки

Пластина фіксації ременю виготовляється із сплаву алюмінію Д16. Технологія виготовлення – фрезерна обробка. Дана деталь має бути легкою, з високою жорсткістю і відсутністю деформації. Деталь жорстко кріпиться трьом гвинтами М3 до корпусу блоку каретки. У свою чергу до пластина фіксації ременю двома пластинами та чотирма гвинтами М3 кріпиться привідний ремінь 3D принтеру. Ескіз пластина фіксації ременю зображено на рисунку 3.3.

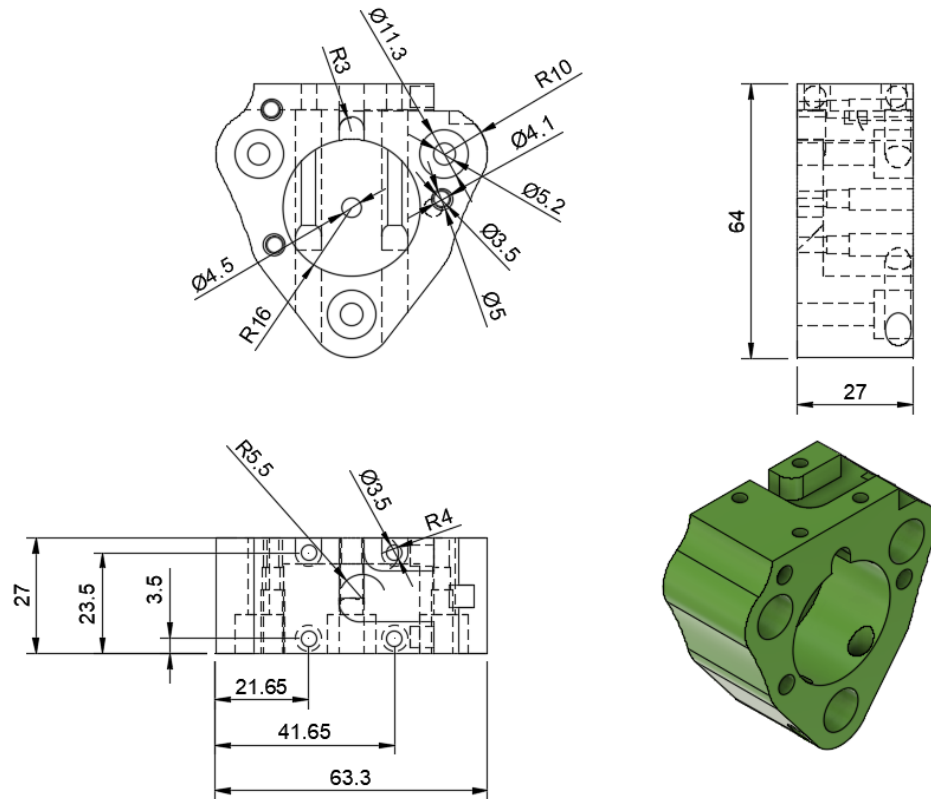


Рисунок 3.3 – Ескіз корпусу блоку каретки

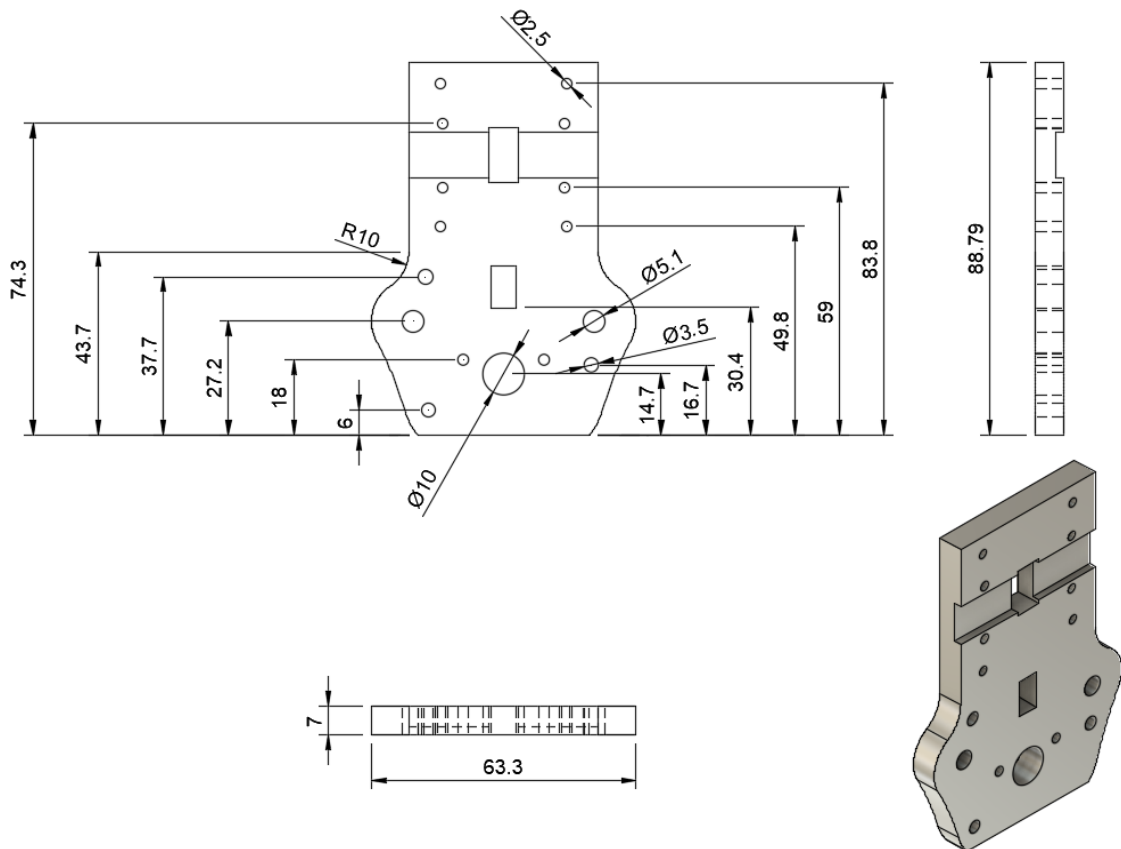


Рисунок 3.4 – Ескіз пластини фіксації ременю

Для запобігання пошкодження дротів електромагніту та кінцевого вимикача вони захищені стандартним гофрованим елементом, який фіксується направляючою гофрованого елемента захисту дротів (рисунок 3.5). Дана деталь має бути легкою та міцною, виготовляється із термопласту соРЕТ, якій має високу міцність, твердість та термічну стійкість. Технологія виготовлення – 3D друк FFF. Фіксація гофрованого елемента захисту дротів відбувається завдяки двом стяжкам.

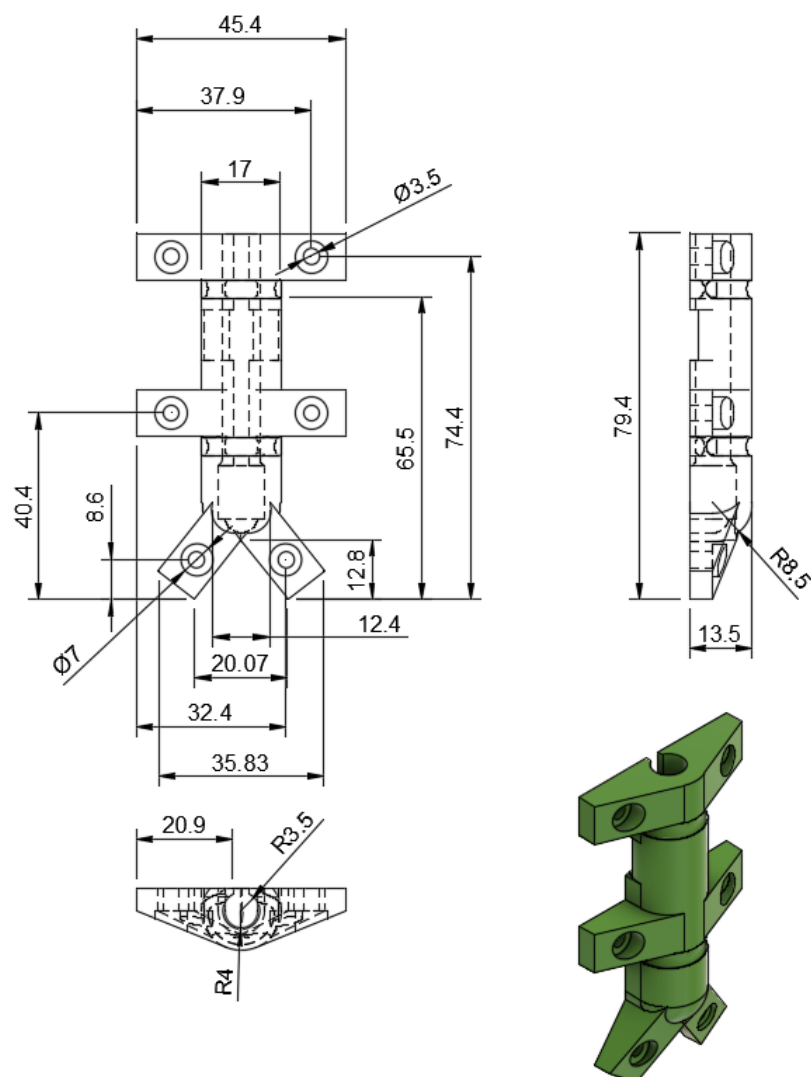


Рисунок 3.5 – Ескіз направляюча гофрованого елемента захисту дротів

Пластини затискання ременів використовуються для фіксації кінців ременів GT2 на блоці каретки. Дві пластини виготовляються із листової сталі 4 мм, марка сталі Ст3. Виготовлення деталей виконується вручну.

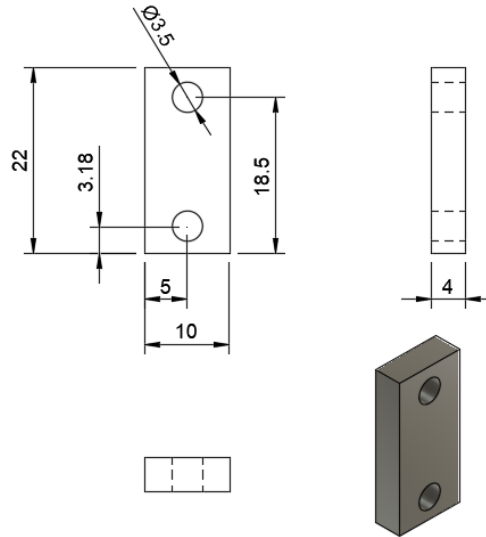


Рисунок 3.6 – Ескіз пластини затискання ременів

Латунні конічні направляючі елементи використовуються для вертикальної орієнтації блока екструдера. Вони фіксуються гвинтами М5 і є підпружиненими. Матеріал деталей – латунь, технологія виготовлення – токарна обробка.

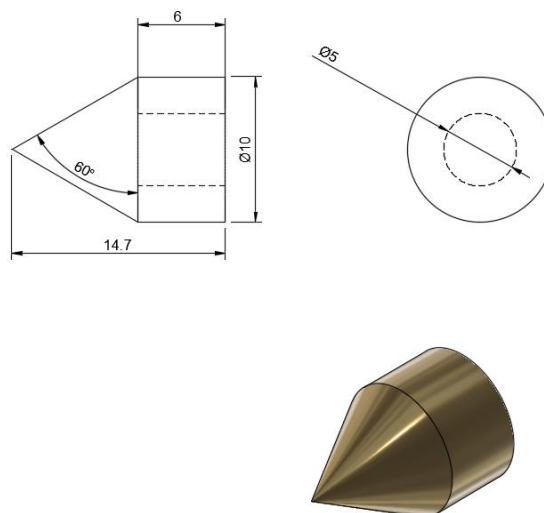


Рисунок 3.7 – Латунні конічні направляючі елементи

Зовнішній вигляд зібраного блоку каретки зображено на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд блоку каретки

### 3.2. Розробка блоку екструдеру

Зовнішній вигляд блоку екструдеру наведено на рисунку 3.9 та 3.10.

Блок екструдеру фіксується на блоці каретки завдяки наявності сталевій феромагнітній платині, що примагнічується до електромагніту, а також трьох воронкоподібних направляючих, що забезпечують вертикальну орієнтацію.

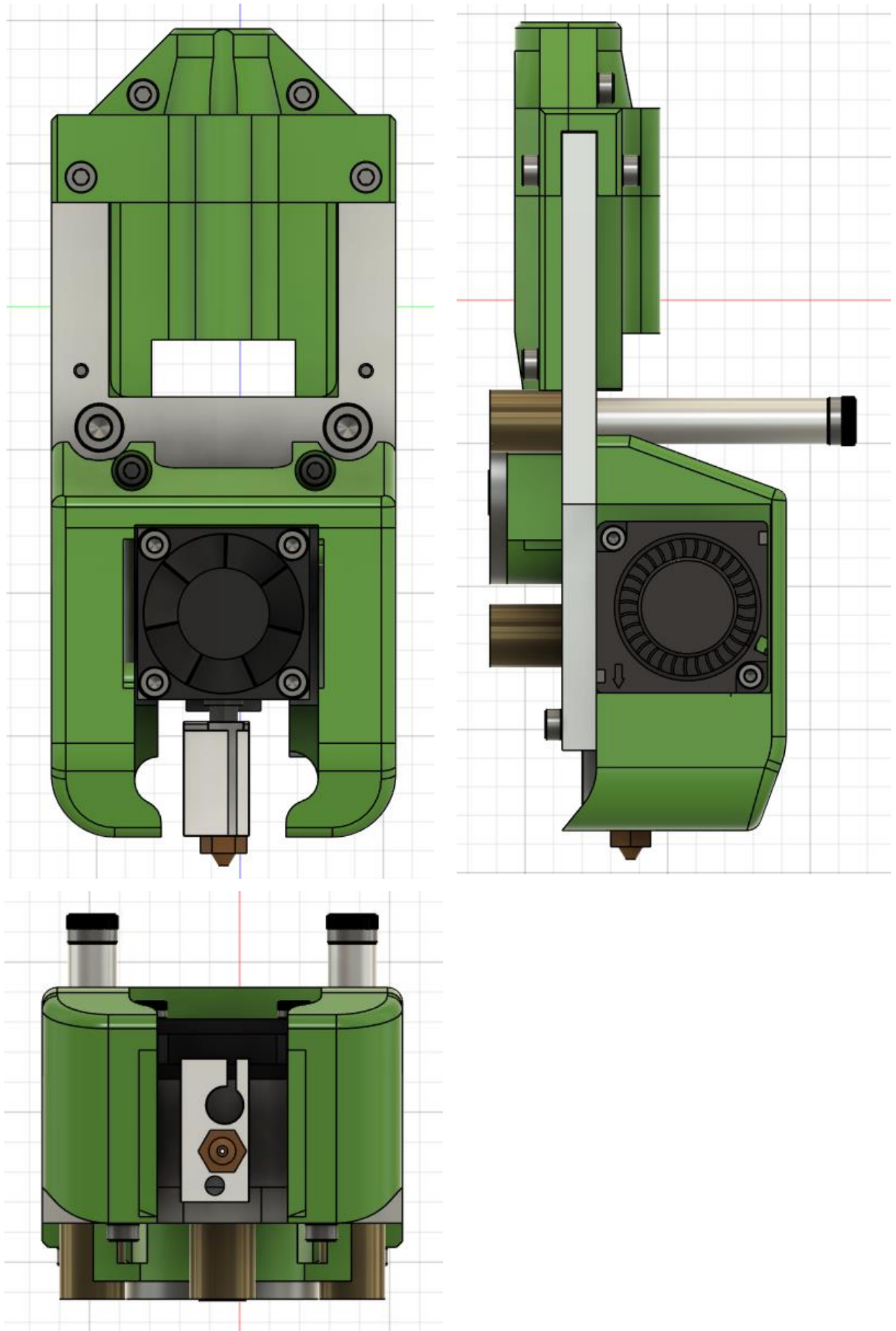


Рисунок 3.9 – Ескіз блоку екструдеру

Блок екструдеру містить наступні стандартні елементи:

- екструдер із блоком нагріву Volcano;
- вентилятор обдуву екструдера 30x10 мм;
- вентилятори-равлики обдуву деталі 30x10 мм;
- роз'єм 8 pin ATX;
- алюмінієві трубки;
- гвинти та різьбові бонки.

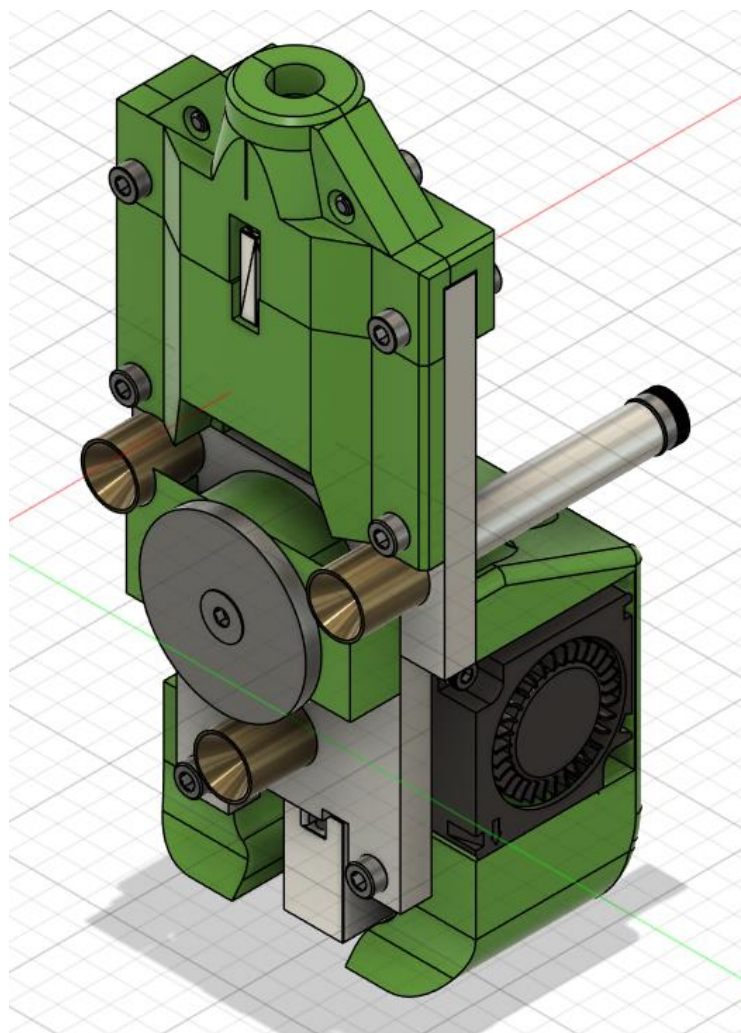


Рисунок 3.10 – Модель блоку екструдеру

Роз'єм ATX 8 pin використовується для підключення нагрівального елемента, термістору, вентилятору обдуву екструдеру, вентиляторів обдуву деталі.

До нестандартних деталей відносяться:

- пластина екструдеру;
- кожух екструдеру;
- сталевий феромагнітний диск;
- проставка феромагнітного диску;
- латунні воронкоподібні направляючі елементи;
- корпус Female частини роз'єму;
- корпус Male частини роз'єму;
- кришка Male частини роз'єму.

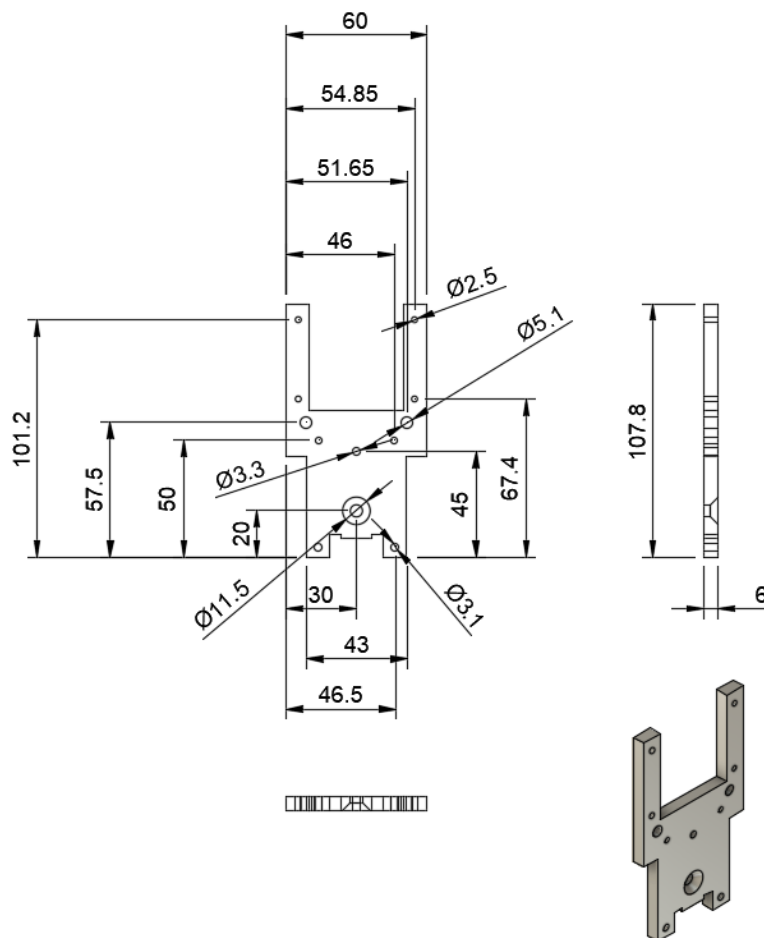


Рисунок 3.11 – Ескіз пластина екструдеру

Основою для зборки блоку екструдера є пластина екструдера. Деталь виготовляється із сплаву алюмінію Д16. Технологія виготовлення – фрезерна обробка. Дана деталь має бути легкою, з високою жорсткістю і відсутністю деформації. Технологія виготовлення – лазерна різка. Фаска центрального отвору виконується вручну.

Кожух екструдера фіксується на пластині екструдера. На кожусі кріпиться екструдер та два вентилятора-равлика. Деталь виготовляється із термопласту соРЕТ, якій має високу міцність, твердість та термічну стійкість. Технологія виготовлення – 3D друк FFF. Для створення різьбових з'єднань у кожусі екструдера вплавлені латунні різьбові бонки. У кожусі екструдера також розташовані канали та форсунки обдуву деталі, що друкується.

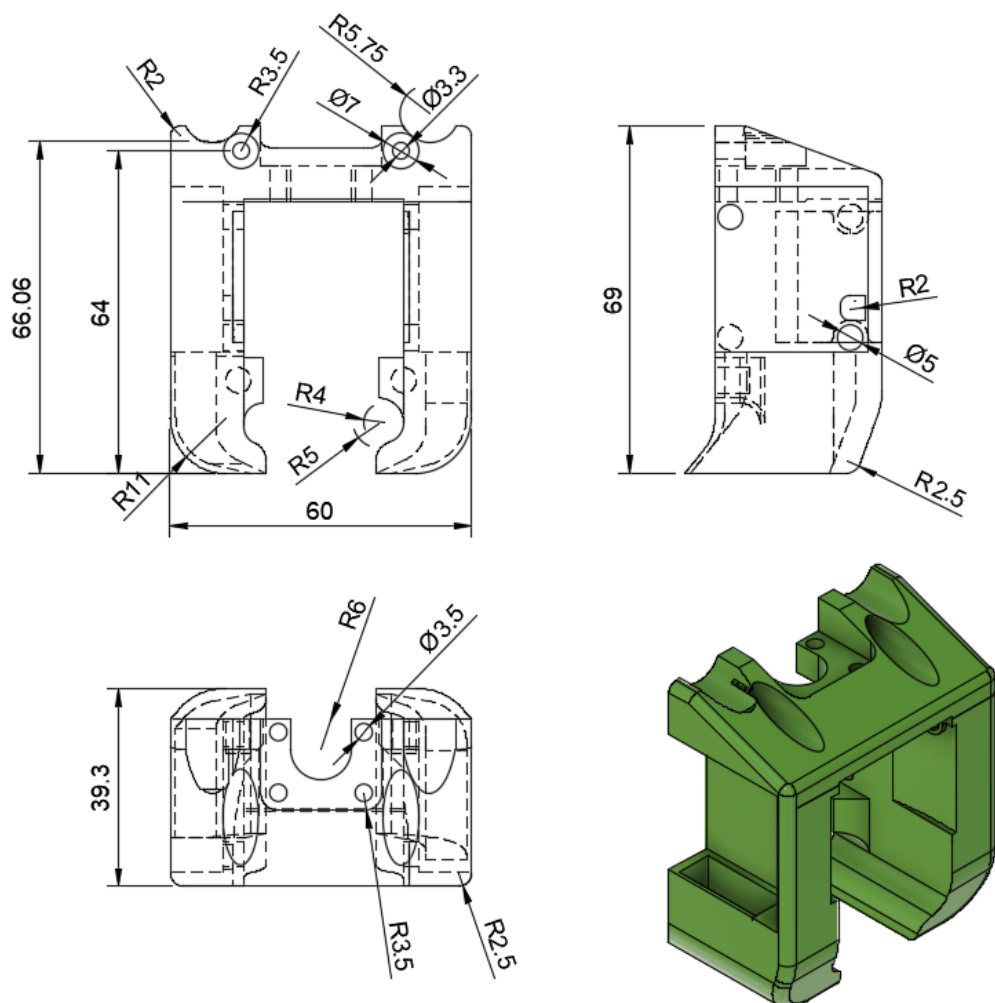


Рисунок 3.12 – Ескіз кожуха екструдера

Сталевий феромагнітний диск необхідний для контакту блоку екструдеру з блоком каретки (рисунок 3.13). З одного боку диск має бути більш товстим для збільшення надійності фіксації, з іншого – тонким для зменшення маси конструкції. Експериментально досліджено що необхідною і достатньою товщиною є 3мм.

Диск має виготовлятися обов'язково феромагнітного матеріалу, таким чином сталь Ст3. Технологія виготовлення деталі – лазерна різка, фаска для гвинта фіксації виготовляється вручну.

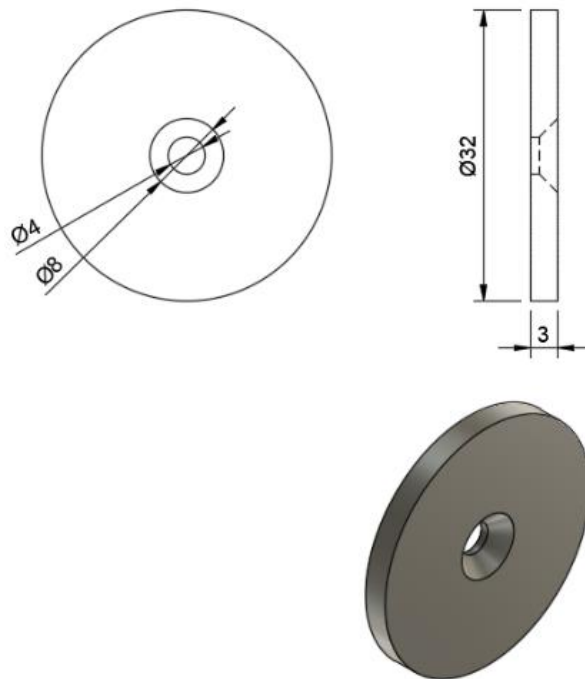


Рисунок 3.13 – Сталевий феромагнітний диск

Проставка феромагнітного диску використовується для зменшення товщини сталевого феромагнітного диску для зменшення маси та для створення каналів для системи дротів екструдеру (рисунок 3.14). Деталь виготовляється із термопласту соPET, якій має високу міцність, твердість та термічну стійкість. Технологія виготовлення – 3D друк FFF.

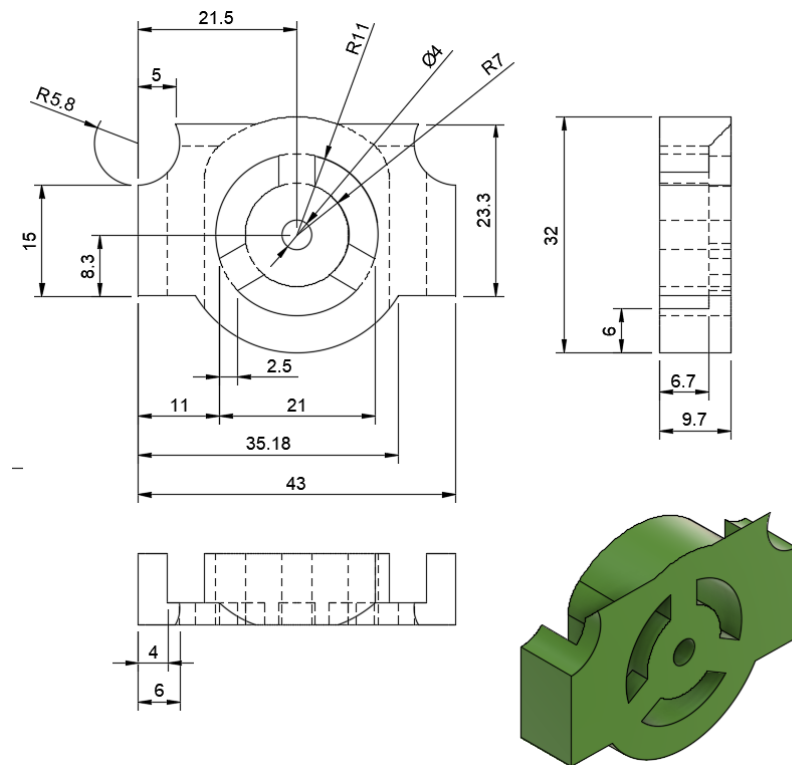


Рисунок 3.14 – Проставка феромагнітного диску

Латунні воронкоподібні направляючі елементи використовуються потрібний як елементи вертикальної орієнтації екструдера відносно блока каретки (рисунок 3.15). Вони контактуються з латунними кінчними направляючими елементами на блоці екструдера. Технологія виготовлення – токарна обробка.

Наступні три деталі використовуються для роз'єму підключення екструдера до дротової системи, що у свою чергу підключено до плати керування принтеру. Роз'єм що використовується це ATX 8 pin він необхідний для пришвидшення заміни електричних компонентів екструдера за необхідністю.

Першою деталлю є корпус Female частини роз'єму (рисунок 3.16). Деталь кріпиться до пластини екструдера двома гвинтами м3, роз'єм тримається в корпусі завдяки засувкам. Деталь виготовляється із термопласту соPET. Технологія виготовлення – 3D друк FFF.

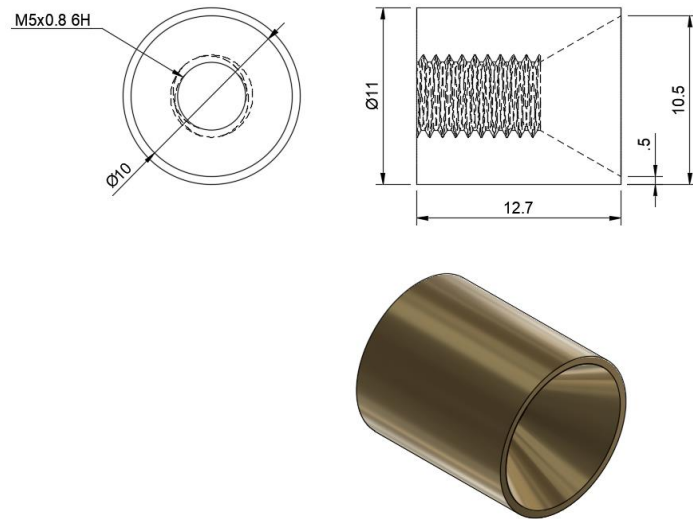


Рисунок 3.15 – Латунні воронкоподібні направляючі елементи

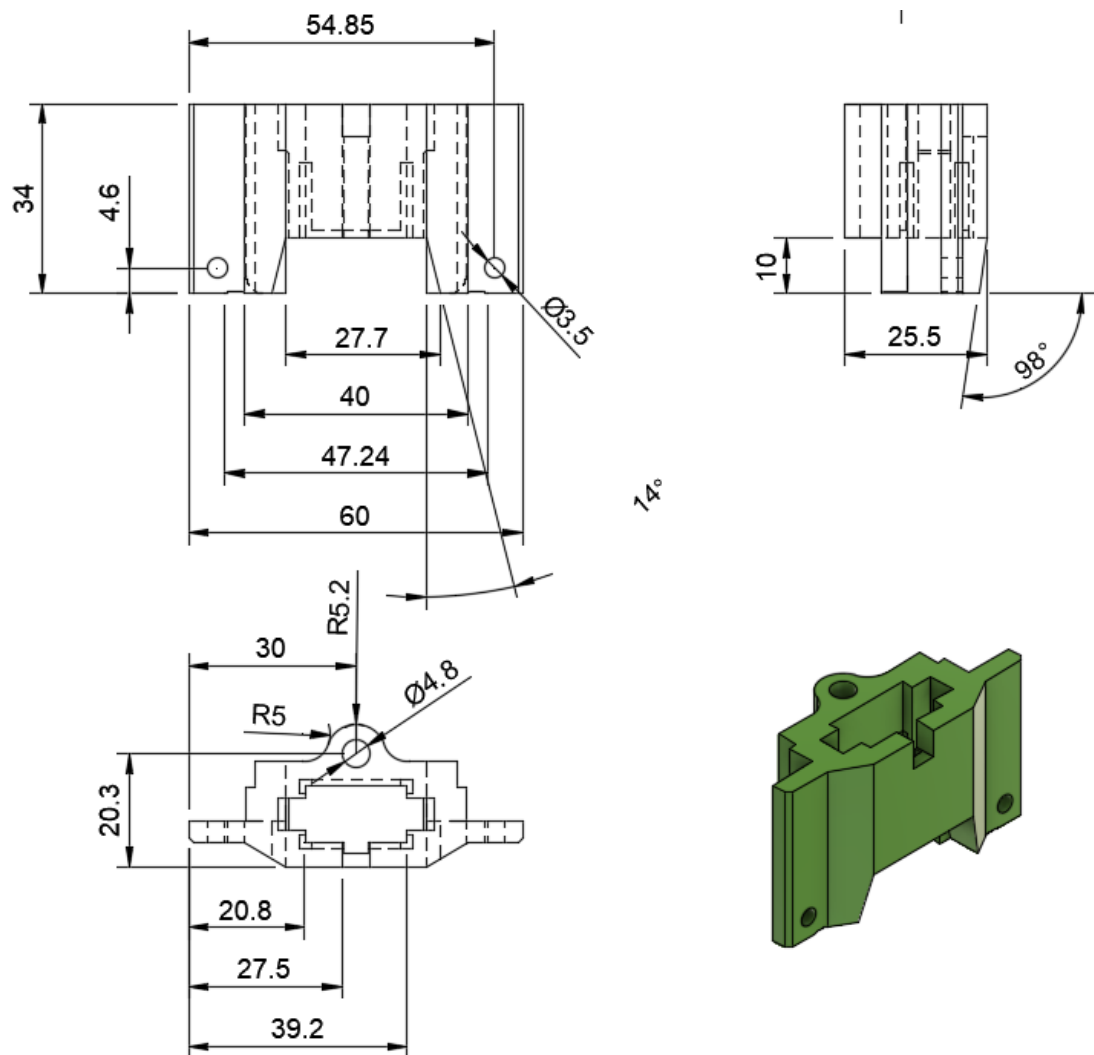


Рисунок 3.16 – Корпус Female частини роз'єму

Фіксатор Male частина роз'єму складається із двох частин: корпусу та кришки. Обидві частини виготовляються із термопласту соPET, технологія виготовлення – 3D друк FFF. Поділ на дві частини обумовлено необхідністю надійності кріплення до пластини екструдера, необхідністю фіксації гофрованого каналу для прокладання дротової системи та простотою доступу до роз'єму у разі необхідності підключення або відключення екструдера. В корпусах Male та Female частин роз'єму також знаходиться канал для прокладання фторопластового каналу філаменту, що поступає в екструдер.

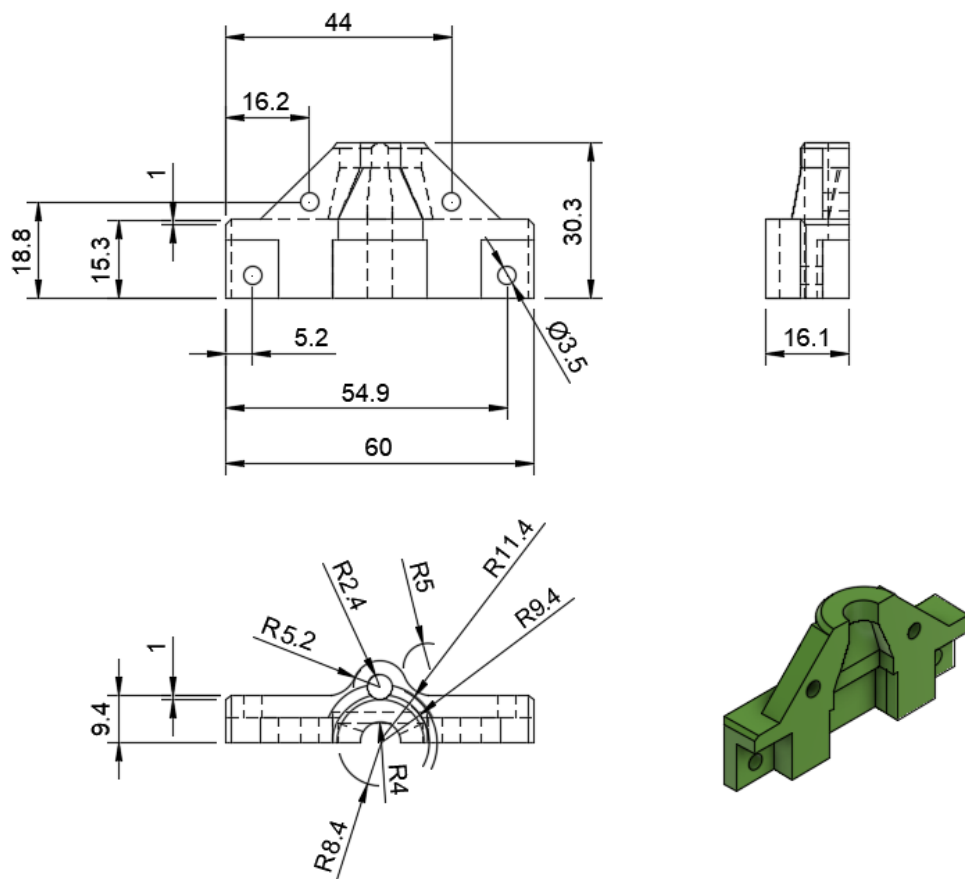


Рисунок 3.17 – Корпус Male частини роз'єму

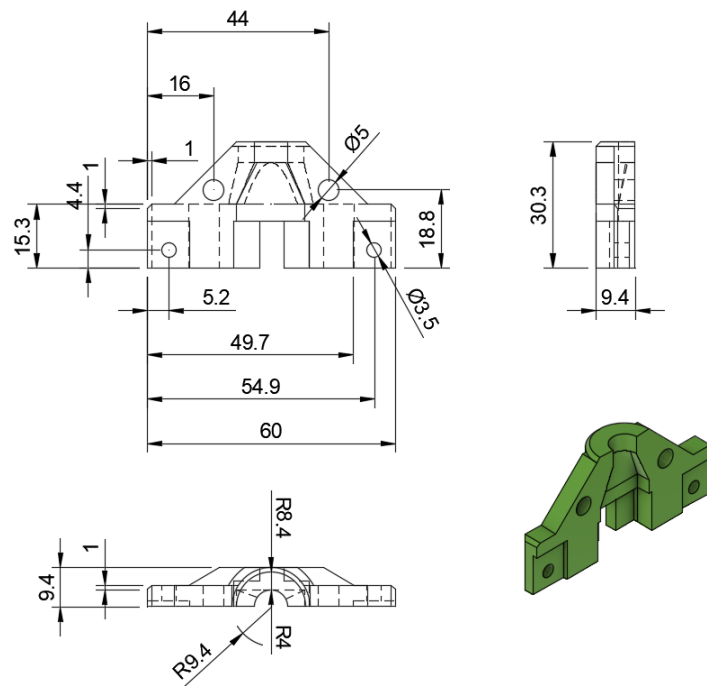


Рисунок 3.18 – Кришка Male частини роз'єму

Зовнішній вигляд блока екструдера наведено на рисунку 3.19.

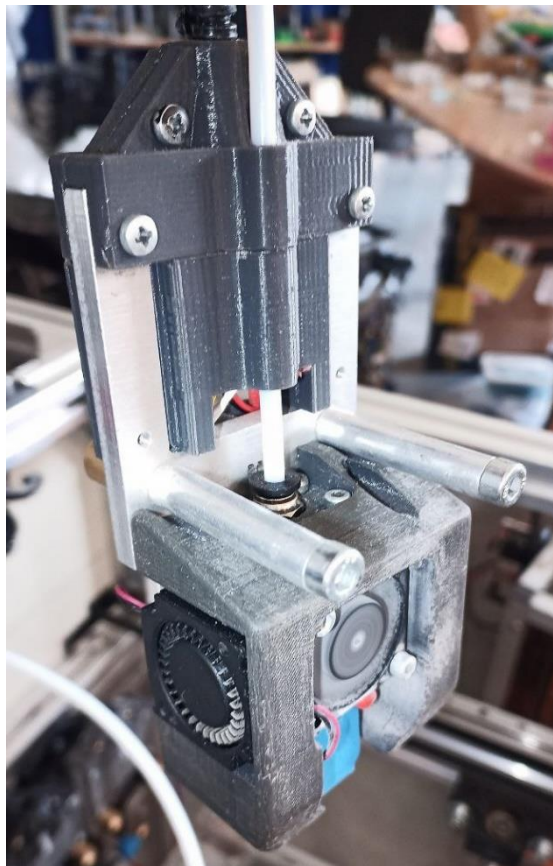


Рисунок 3.19 – Зовнішній вигляд блока екструдера

### 3.3 Розробка тримача екструдера

Зовнішній вигляд блоку тримача екструдера наведено на рисунках 3.20 та 3.21. Тримачі екструдерів використовуються для утримання неактивних екструдерів. Фіксація відбувається з рахунок наявності двох неодимових магнітів у блоці тримача екструдера і двох сталевих гвинтів у блоці екструдера.

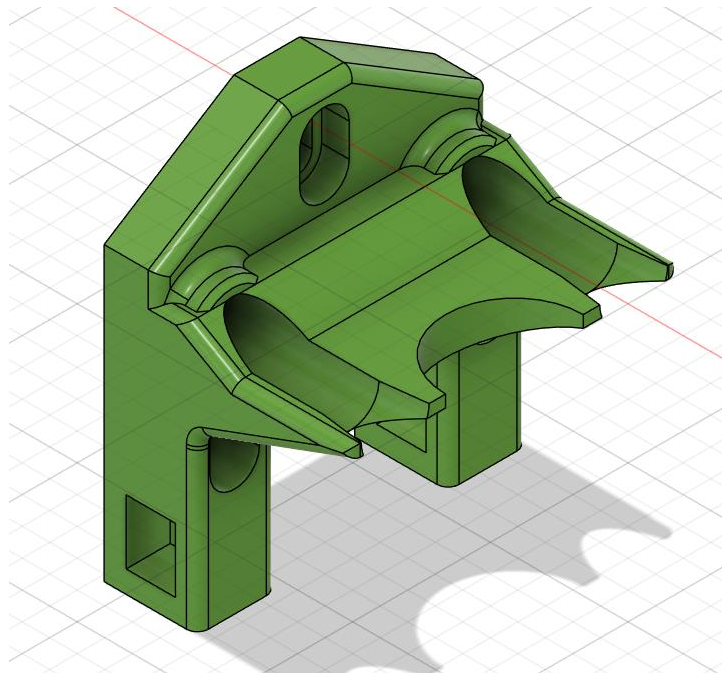


Рисунок 3.20 – Блоку тримача екструдера

Основною задачею блоку тримача екструдера є коректна орієнтація блоку екструдера для коректного захоплення його блоком каретки. Разом із тим наявність магнітів обумовлена захистом від випадіння екструдера через вібрації принтеру.

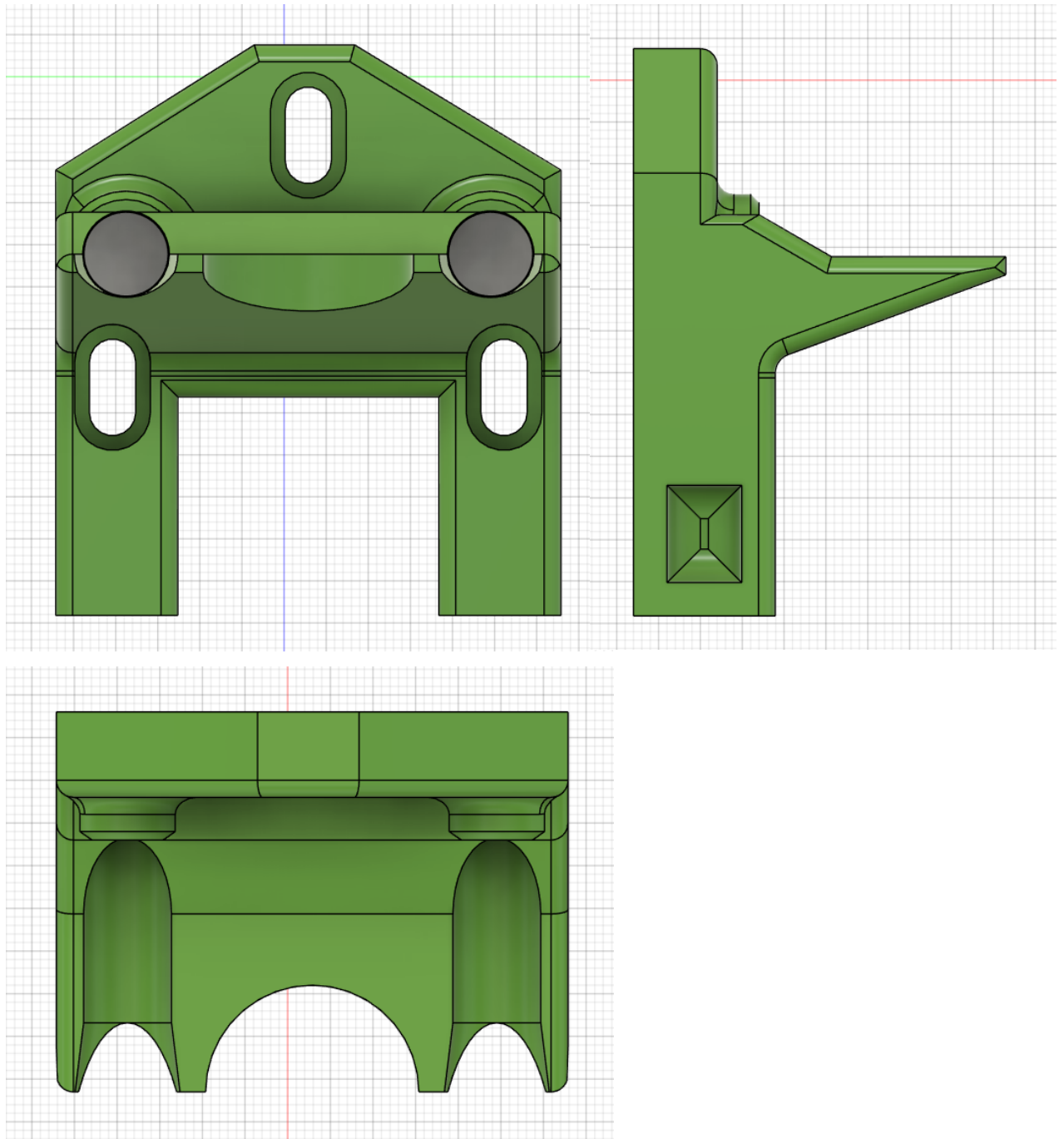


Рисунок 3.21 – Ескіз блоку тримача екструдера

Даний блок складається всього з трьох деталей: двох неодимових магнітів діаметром 10 мм та товщиною 5мм та корпусом блоку тримача (рисунок 3.23).

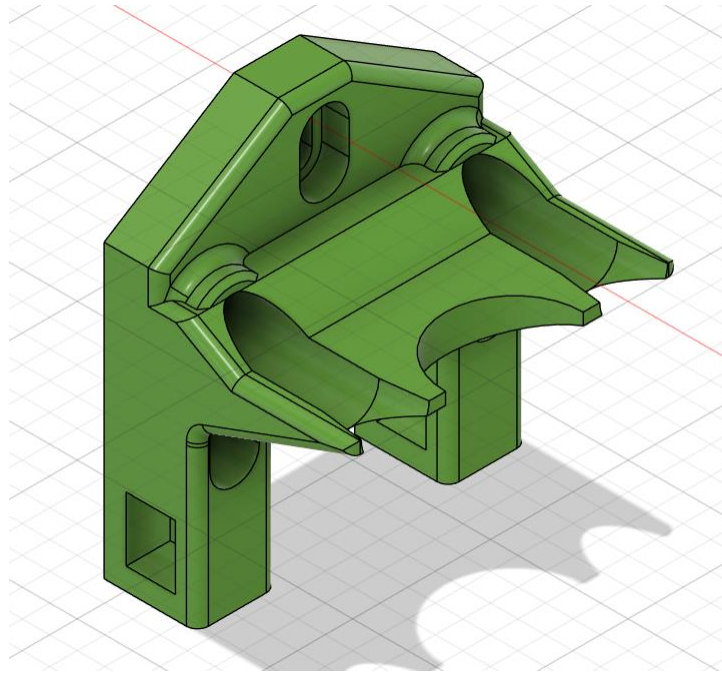


Рисунок 3.22 – Блоку тримача екструдера

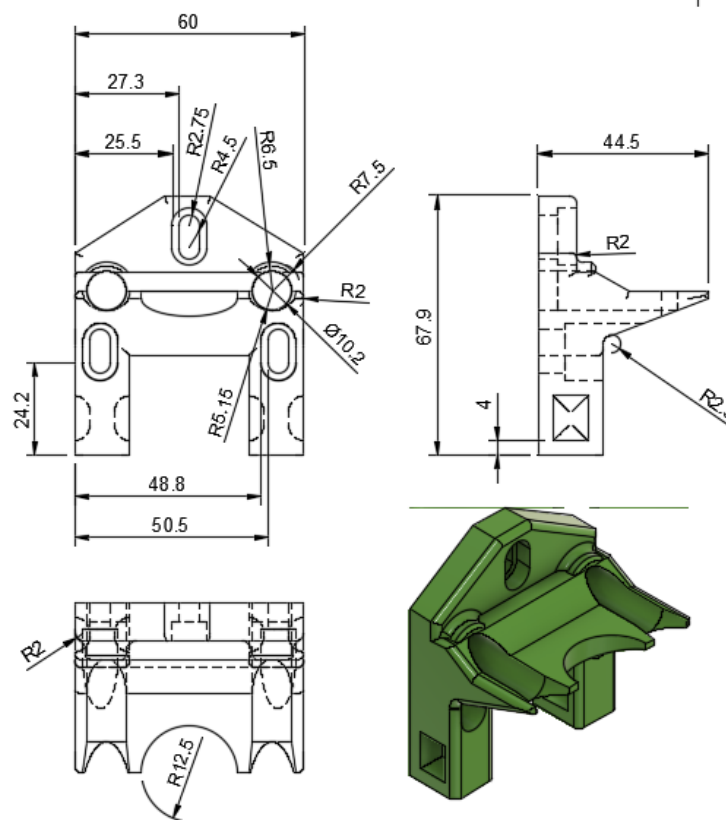


Рисунок 3.23 – Корпус тримача екструдера

Корпус тримача екструдера виготовляється із термопласту соРЕТ за технологією FFF.



Рисунок 3.24 – Зовнішній вигляд тримача екструдера

### 3.4 Принцип роботи розробленої системи Tool Changer

Система Tool Changer працює наступним чином.

На початковому етапі друку все блоки екструдерів знаходяться на тримачах екструдерів і жодна з них не приєднана до каретки (рисунок 3.25). На початку друку відбувається увімкнення електромагніту у блоці каретки, на нього подається напруга.

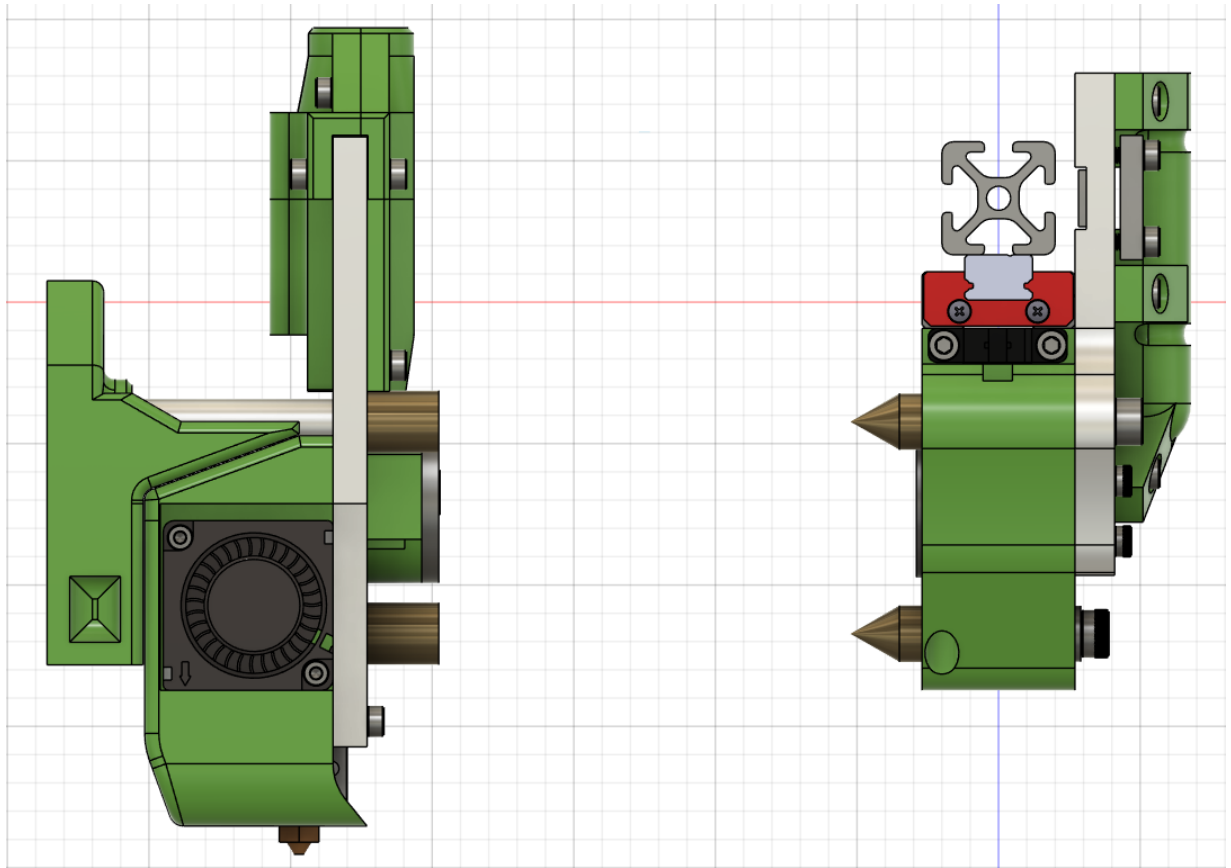


Рисунок 3.25 – Положення системи на початку процесу друку

Далі відбувається вибір екструдера, яким необхідно почати друк. Блок каретки рухається до відповідного блоку екструдерів і наближається до нього до контакту між елементами вертикальної орієнтації: латунними воронкоподібними та латунними конічними направляючими елементами. Цей контакт відбувається по координатним точкам, що необхідно вказати у прошивці 3D принтеру. На даний момент електромагніт вже увімкнено але контакт між електромагнітом та феромагнітною платиною на блоці екструдера ще не відбулося (рисунок 3.26). Екструдер вже зорієнтовано відносно каретки завдяки трьом парам направляючих елементів

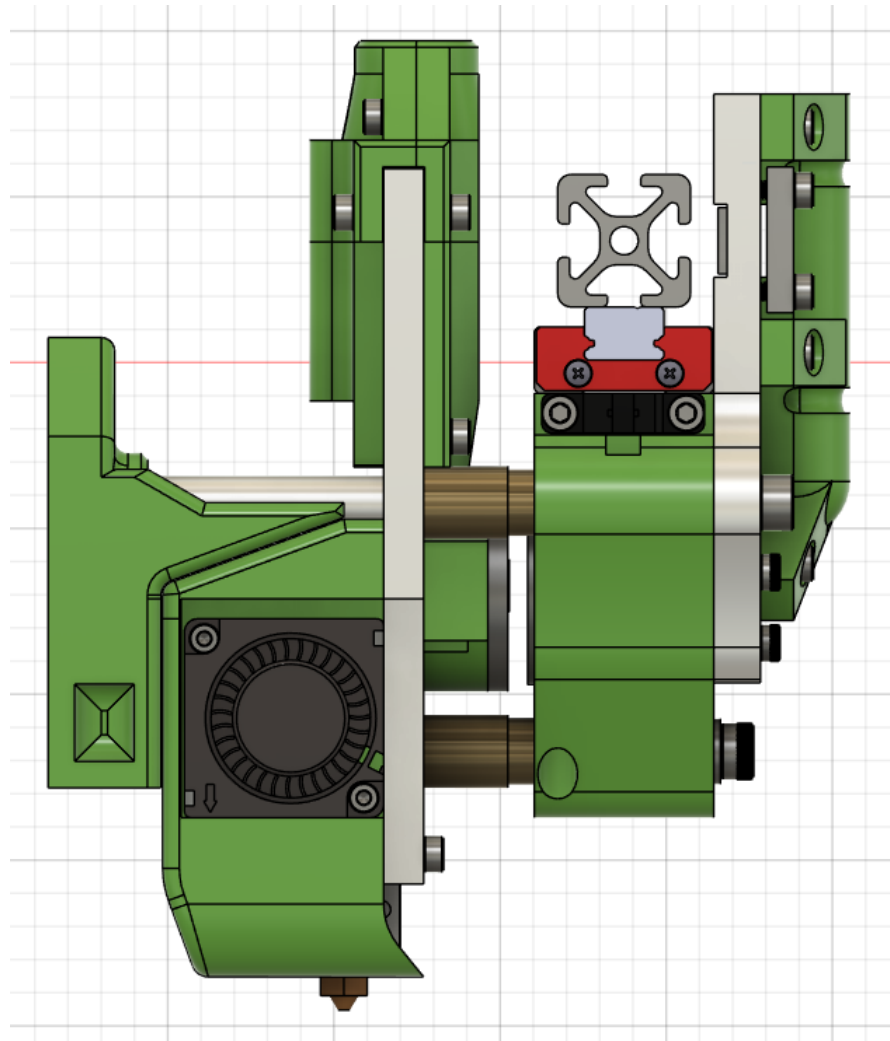


Рисунок 3.26 – Орієнтація блоку каретки відповідно до блоку екструдера

Далі відбувається фіксація блоку екструдера на блоці каретки. При цьому відбувається подальший рух каретки у напрямку осі Y 3D принтеру (ближче до екструдера). Латунні конічні направляючі елементи вже механічно зконтактовано і вони рухаються відносно блока каретки завдяки наявності пружин. Зовні це можна спостерігати по зміщенню головок гвинтів на яких закріплено направляючі (рисунок 3.27). Сталевий феромагнітний диск потрапляє у магнітне поле електромагніту, екструдер фіксується на каретці.

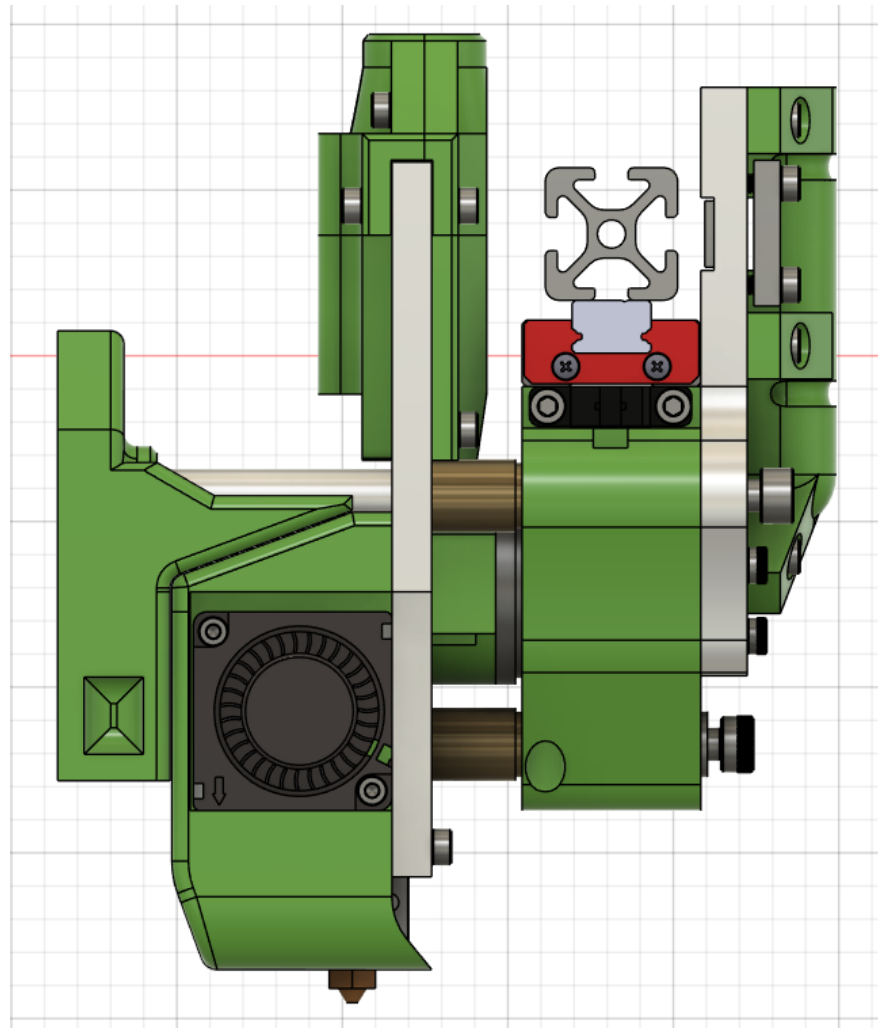


Рисунок 3.27 – Фіксація блоку екструдера на блоці каретки

На наступному етапі каретка рухається у протилежному напрямі і переміщує за собою екструдер. Починається процес друку (рисунок 3.28).

По завершенні процесу друку обраним екструдером каретка повертається у домашнє положення даного екструдера, електромагніт вимикається. Пружини що притискають латунні конічні направляючі елементи виштовхують екструдер і повертають його у тримач екструдера, де екструдер фіксується неодимовими магнітами. Далі каретка або захоплює новий екструдер і починає процес друку ним, або друк закінчується і каретка їде у домашнє положення принтеру.

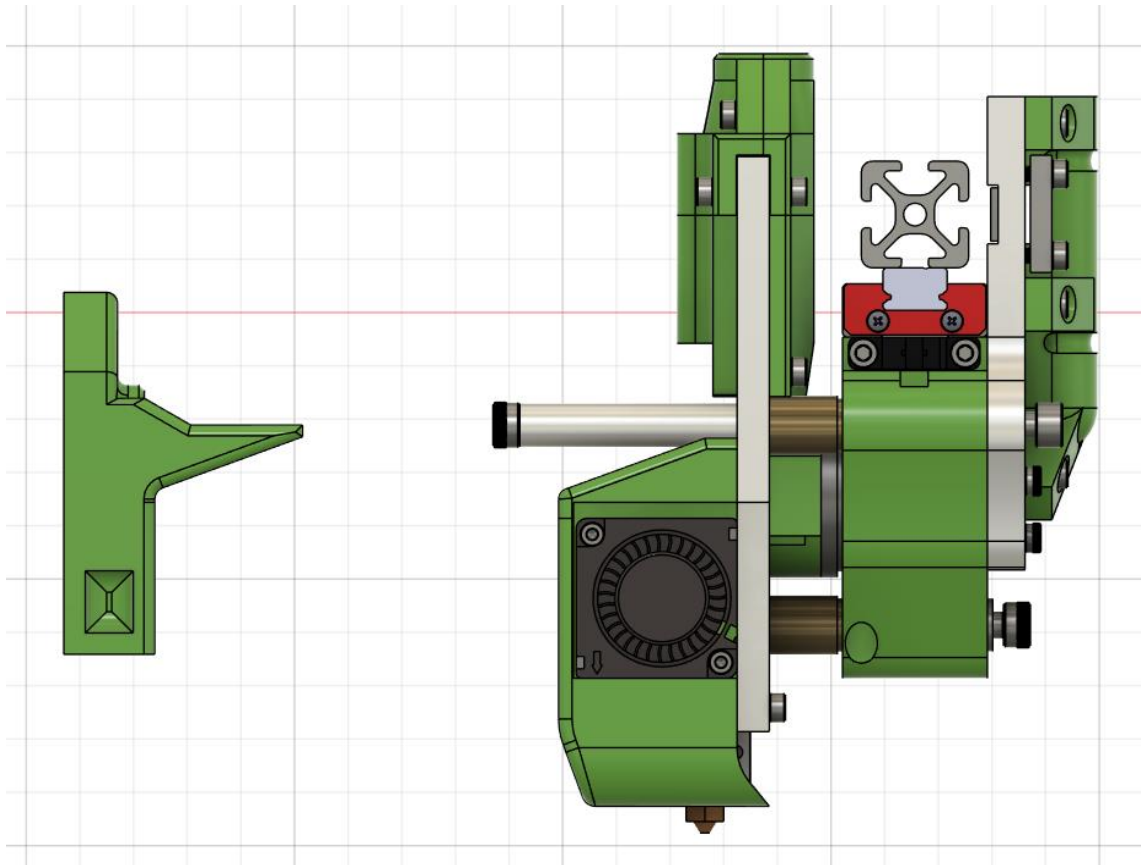


Рисунок 3.28 – Екструдер у робочому положенні на каретці

## 4 СИМУЛЯЦІЯ МЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА СИСТЕМУ TOOL CHANGER

Для перевірки якості магнітної фіксації блоку екструдера до блока каретки необхідно провести симуляцію механічних навантажень та зміщень компонентів конструкції один відносно іншого. Симуляцію, як і розробку 3D моделі вирішено проводити у CAD системі Fusion 360.

Через велику кількість дрібних компонентів таких як гвинти, різьбові бонки, вентилятори елементи самого екструдера (радіатор, нагрівальний блок, термістор, термобар'єр, елемент нагріву) вирішено видалити їх при симуляції і замінити додатковою силою, що відповідає вазі цих елементів. Це рішення викликане великою кількістю поверхонь ( елементи різьби, пластини радіатору, лопаті вентиляторів) як дуже ускладняють процес моделювання. Самі компоненти можна вважати жорстко закріпленими на блоці екструдера (рисунок 4.1).

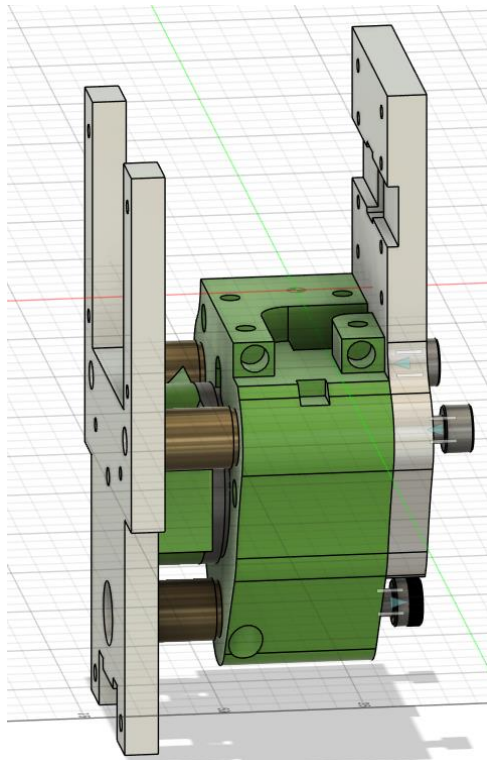


Рисунок 4.1 – Спрощення моделі для симуляції

В першій симуляції проведено моделювання поведінки системи у статичному стані. Ця симуляція має перевірити надійність магнітного механізму захоплення екструдеру. На систему діють сила гравітації, сила – еквівалент ваги компонентів що прибрано для спрощення процесу моделювання та сила еквівалентна тій, що утворює магнітне тяжіння, утворене електричним магнітом каретки (рисунок 4.2).

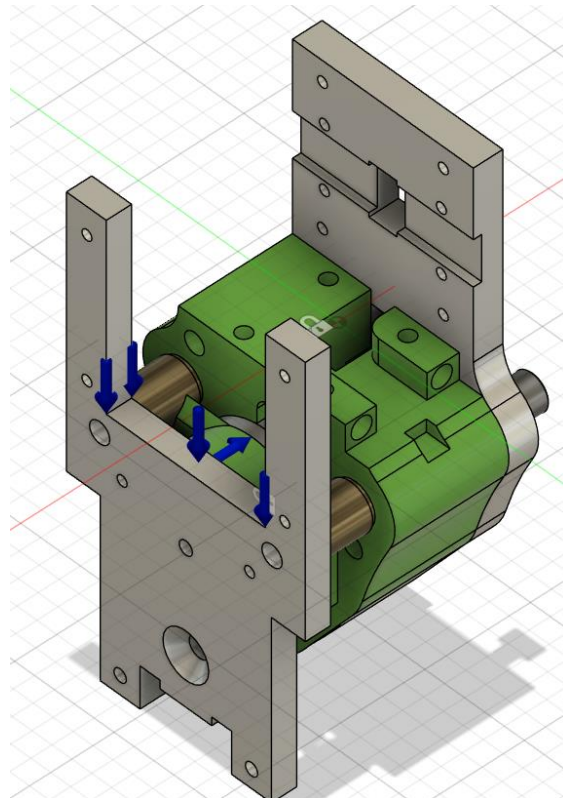


Рисунок 4.2 – Завдання на статичну симуляцію

В результаті симуляції отримані наступні результати:

- розподіл механічної напруги, що виникає в конструкції, Па (рисунок 4.3);
- розподіл геометричного зміщення елементів конструкції, мм (рисунок 4.4);
- контактний тиск, що виникає між компонентами конструкції, Па (рисунок 4.5).

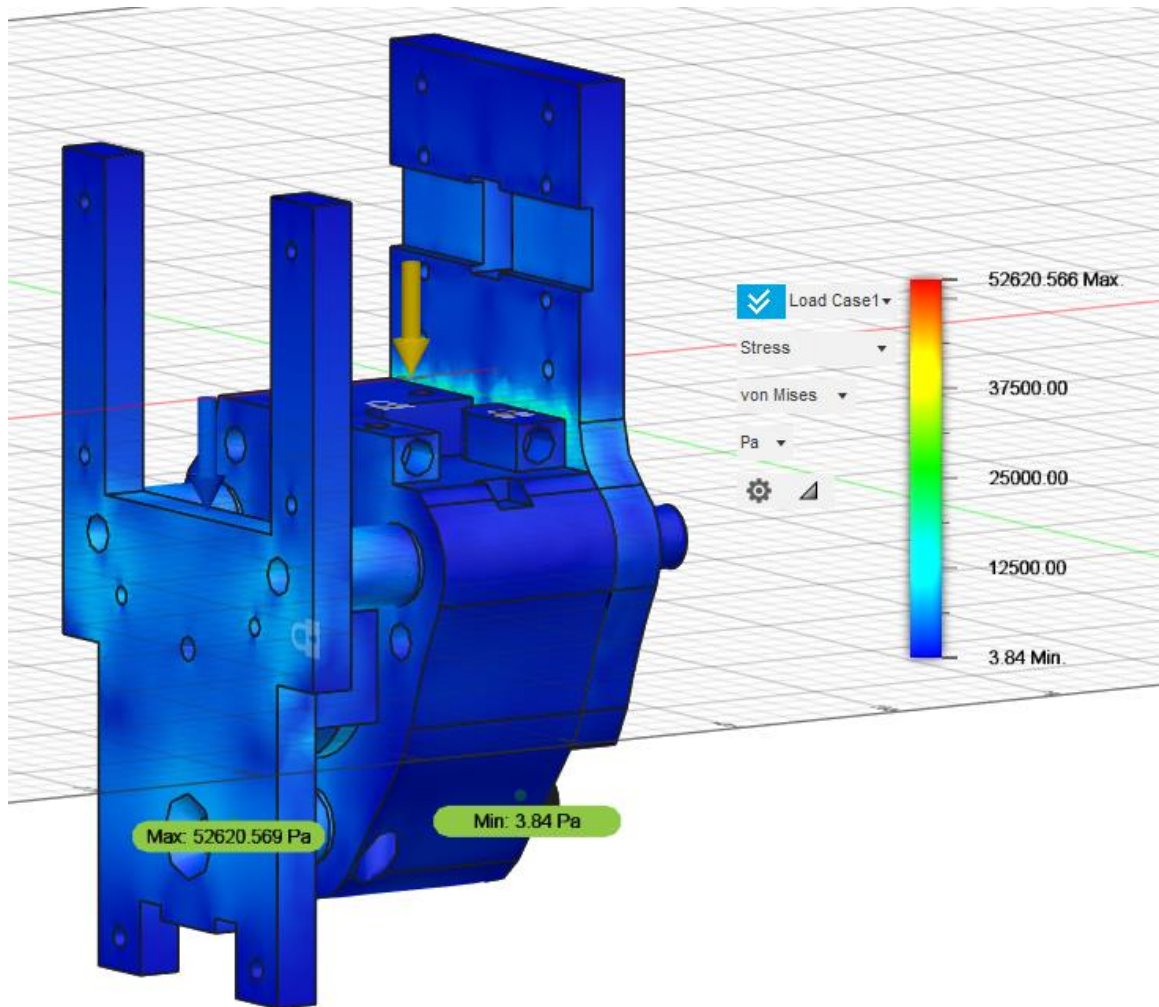


Рисунок 4.3 – Розподіл механічної напруги, що виникає в конструкції

Максимальна механічна напруга, що утворюється у компонентах системи дорівнює 52620.569 Па, причому вона приходить на алюмінієву пластину екструдера в зоні фіксації феромагнітного диску. Така механічна напруга є абсолютно безпечною і в жодному разі не зможе викликати руйнування системи.

На рисунку 4.4 відображено результат моделювання розподіл геометричного зміщення елементів конструкції. Одиниці вимірювання – міліметри. Ця симуляція є однією з найважливіших, бо саме вона дозволила до моменту виготовлення експериментального зразку перевірити якість магнітного контактування Changing Tool.

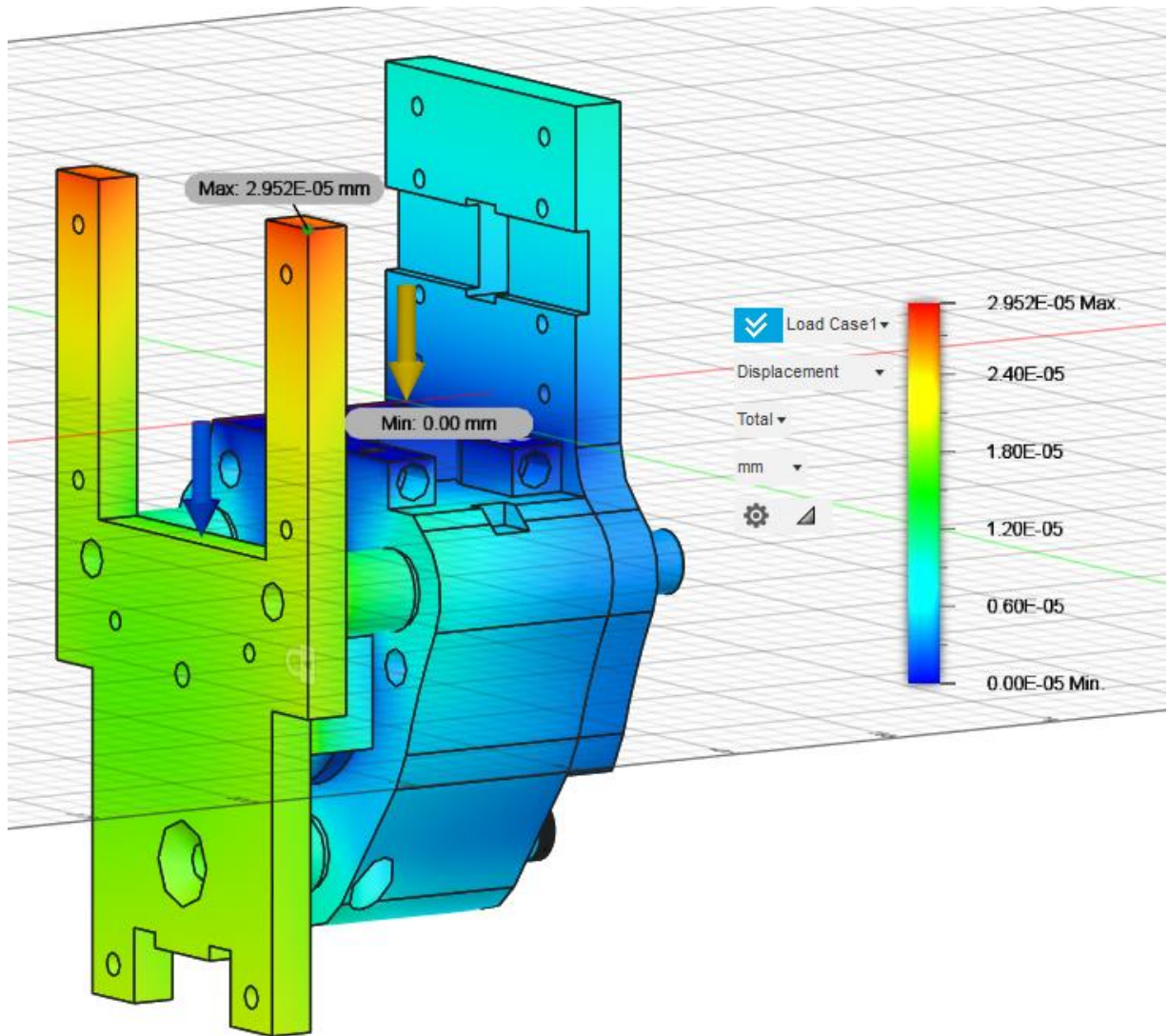


Рисунок 4.3 – Розподіл геометричного зміщення елементів конструкції

Ця симуляція дає змогу стверджувати що обраний електричний магніт та розроблена система вертикального позиціонування повністю забезпечують умовам їх використання в розробленій системі Changing Tool. Зміщенням блоку екструдера відносно блоку каретки можна знехтувати, вони вкрай незначні. Найбільші деформації відбуваються у верхній частині алюмінієвої пластини, але вони теж вкрай малі і складають лише  $0,2952 \cdot 10^{-6}$  мм. В реальних умовах ці зміщення будуть більше через допуски на виготовлення деталей, збірку конструкції, але вони все одно мають залишитися незначними для 3D друку за технологією FFF.

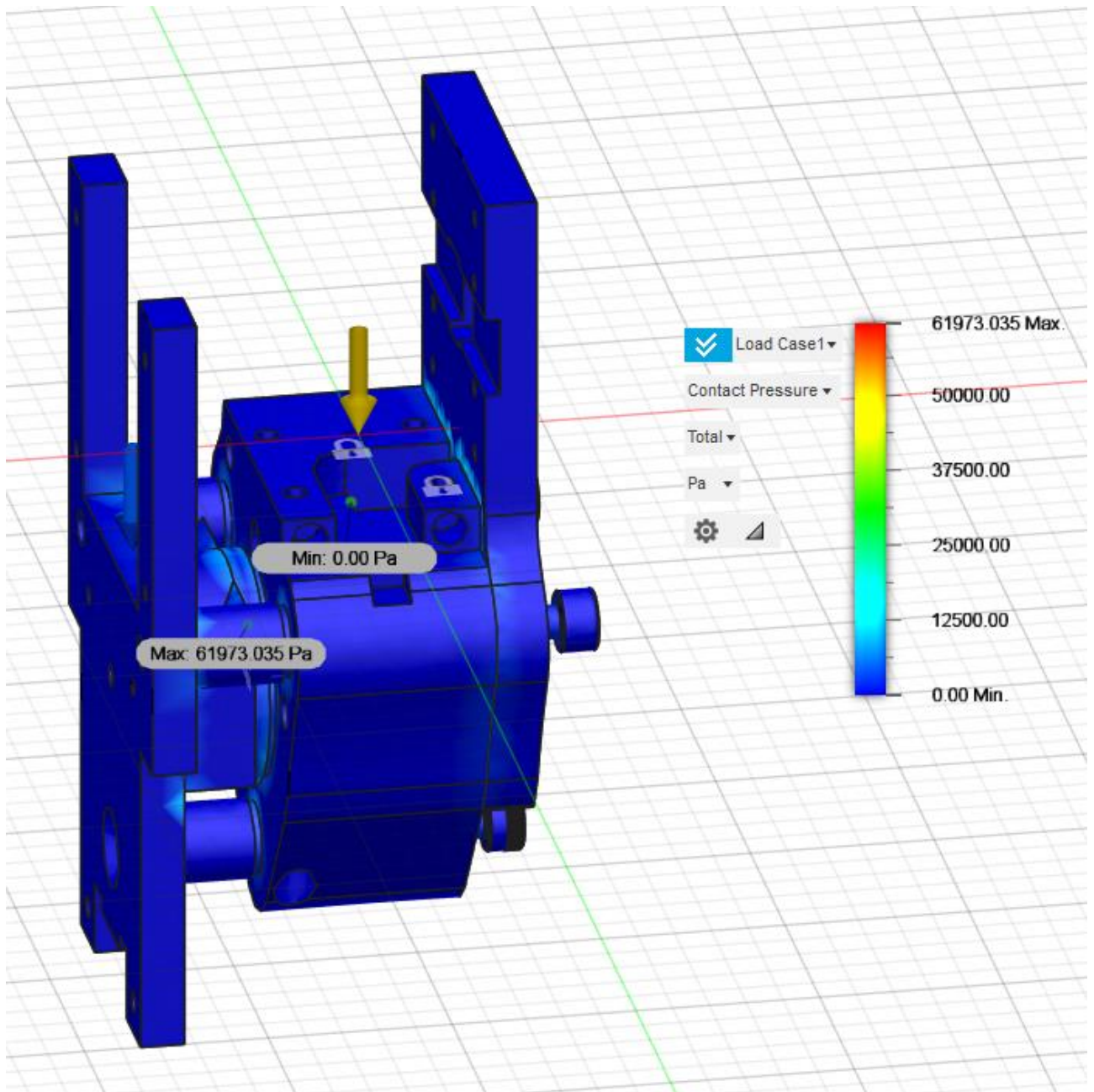


Рисунок 4.5 – Контактний тиск, що виникає між компонентами конструкції

Максимальний контактний тиск виникає у сталевому феромагнітному диску та термопластичній проставці із матеріалу соPET і складає 61973,035 Па, що приблизно дорівнює 0,611 атмосфери. Цей контактний тиск також є безпечним і не викличе ні незворотної деформації ні руйнування цих деталей.

Через те що 3D принтер працює у динамічному режимі вирішено провести симуляцію роботи екструдера в процесі 3D друку, а саме знайти його

резонансну частоту а також місця максимальних механічних деформацій частин екструдера при цій частоті. Згідно літератури [4] частоти коливань екструдерів FFF/FDM 3D принтерів в процесі друку знаходяться у діапазоні 1 – 400 Гц. Бажано отримати резонансну частоту розробленої конструкції максимально віддалену від вказаного діапазону.

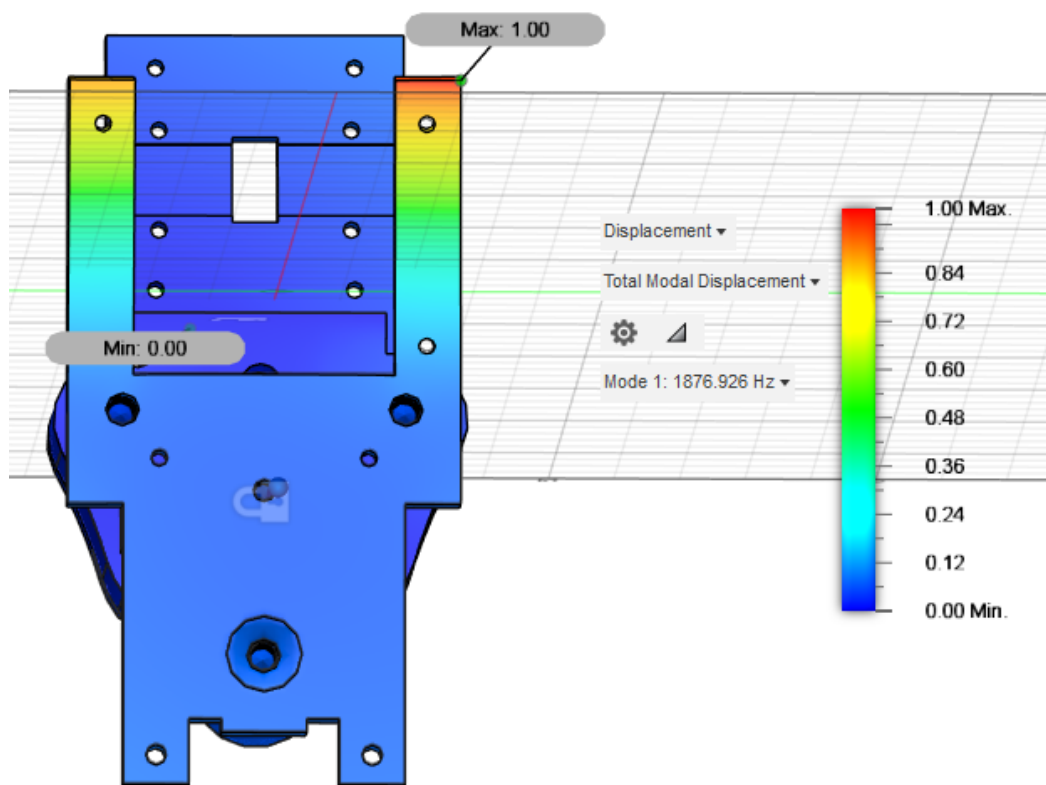


Рисунок 4.6 – Відносні деформації, що виникають у конструкції на резонансній частоті

Результати симуляції наведено на рисунку 3.6, згідно якого резонансна частота конструкції має значення 1876,926 Гц. А максимальні деформації знаходяться у верхній частині алюмінієвої пластини екструдера, де кріпиться система його дротів. Ця частина екструдера не має значного впливу на якість друку. Отримані результати моделювання резонансної частоти конструкції не потрапляють у вказаний діапазон. Конструкція повністю задовольняє вимогам 3D друку.

## 5 РОЗРОБКА МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ КРОКОВИМ ДВИГУНОМ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ПЛАСТИКУ

Недоліком приводу крокового двигуна, що використовується в системі подачі пластику, є виникнення частих помилок регулювання. При цьому виникає необхідність забезпечення статичної та динамічної точності процесу позиціонування крокового двигуна. Для проектування приводів крокових двигунів необхідно розробити математичні моделі, що дозволяють адекватно описувати перехідні процеси, що виникають за зміни режиму крокового приводу. Характер перехідного процесу багато в чому визначається системою управління з ПІД-регулятором. Імітаційна модель системи управління із зворотним зв'язком кроковим двигуном системи подачі філаменту розроблена у програмному середовищі MATLAB&Simulink. Параметричний синтез регулятора виконаний засобами функціонального блоку Function Block Parameters: PID Controller середовища Simulink.

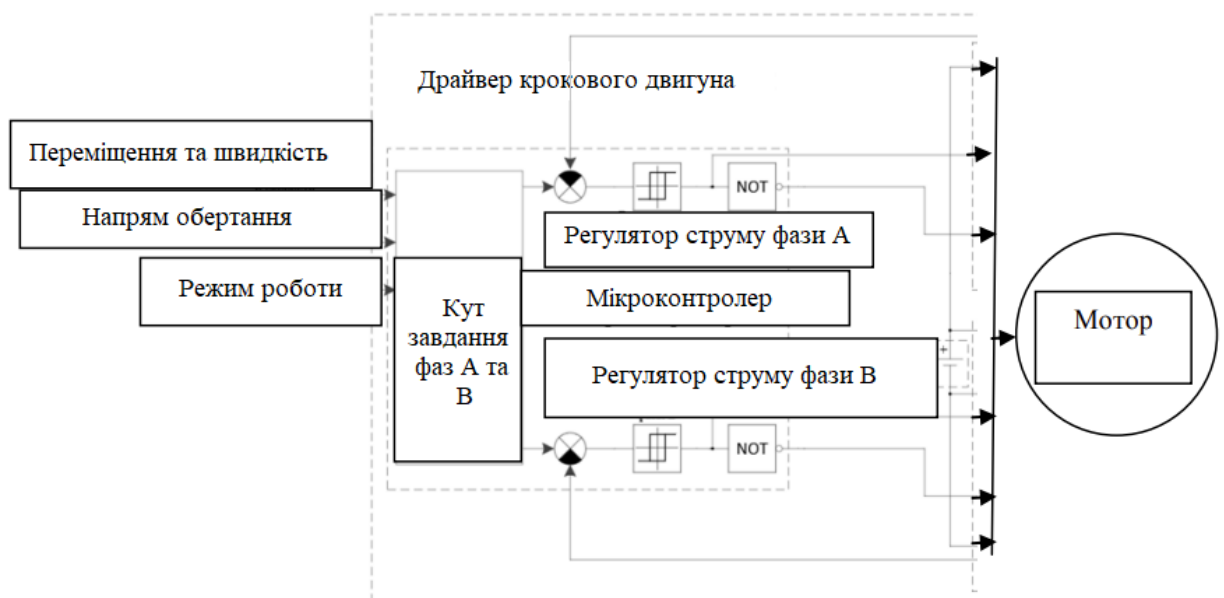


Рисунок 5.1 – Функціональна схема керування живленням крокового двигуна

Синтезовані параметри моделі безперервного ПІД регулятора моделі керування кроковим двигуном дорожнього принтера забезпечують задані показники якості перехідного процесу. Час регулювання становить 0,036 с. Перехідний процес відбувається без перерегулювання, що є важливою властивістю точного дозування пластику. Моделювання динамічних процесів у приводі крокового двигуна дозволило встановити мінімальну величину часу спрацювання безперервного ПІД-регулятора.

Розглянуто варіант системи керування з ПІД-регулятором кроковим двигуном. ПІД регулятори застосовують у системах управління для поліпшення як виду перехідного процесу, так і точності в режимі, що встановився. Передатна функція ідеального ПІД регулятора  $W_{PID}(s)$  має вигляд:

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s,$$

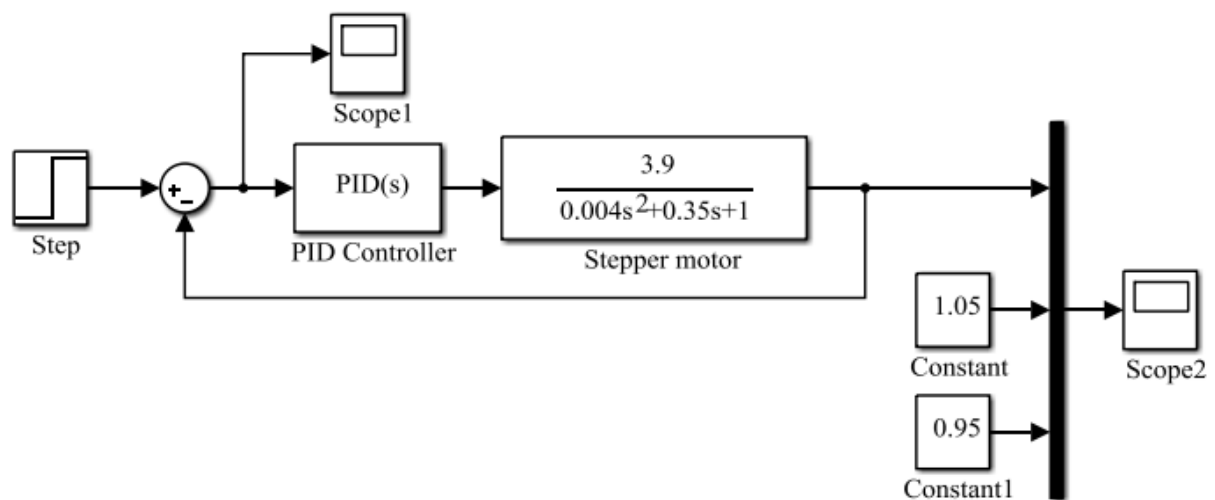


Рисунок 5.2 – Імітаційна модель системи управління з ПІД-регулятором

де  $K_p$ , - параметр пропорційного елементу регулятора,

$K_i$  – інтегрального елементу регулятора,

$K_D$  - диференціюючого елементу регулятора,

$s$  – оператор.

Імітаційна модель системи управління зі зворотним зв'язком кроковим двигуном принтера розроблена у програмному середовищі MATLAB&Simulink (рис. 5.1). Новизна визначається сучасною технологією 3D друку.

Завдання показників якості перехідного процесу:

- аперіодичний процес без перерегулювання;
- час регулювання – менше 0,05 с.

Виконано дослідження стійкості системи у розімкненому стані на основі критерію Найквіста (рис. 5.2).

Параметричний синтез регулятора виконаний засобами функціонального блоку Function Block Parameters: PID Controller середовища Simulink. Результати параметричного синтезу моделі безперервного ПІД-регулятора засобами програми MATLAB&Simulink представлені малюнку 5.3.

Результати моделювання перехідного процесу моделі системи об'єктом наведено малюнку 5.4.

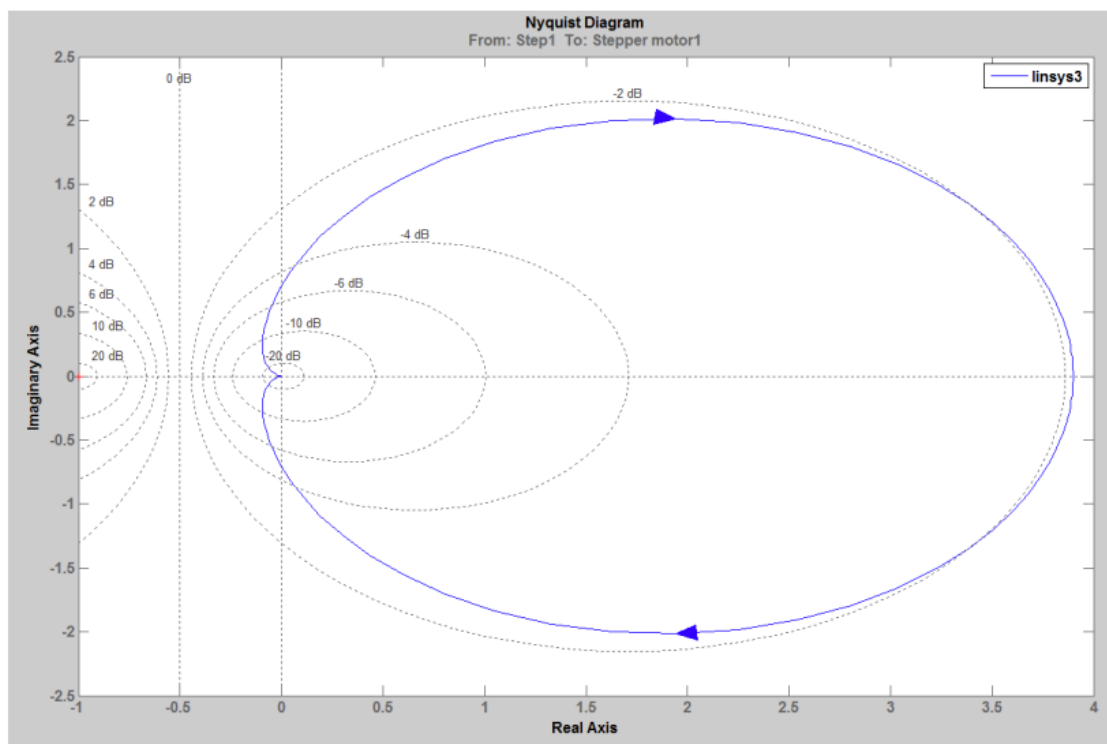


Рисунок 5.3 – Годограф Найквіста (система стійка)

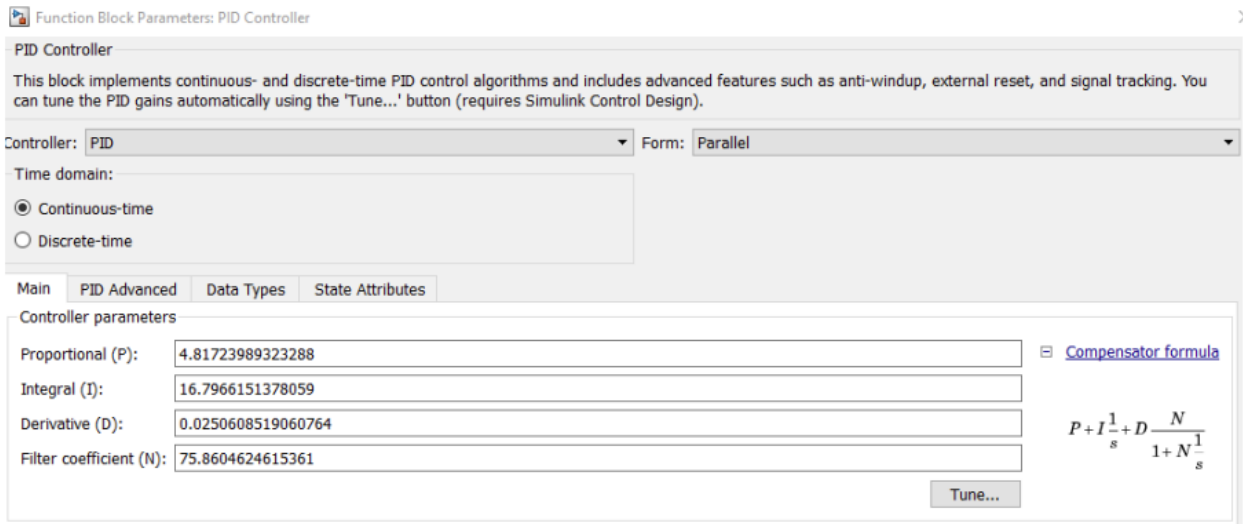


Рисунок 5.4 – Панель функціонального блоку Function Block Parameters середовища Simulink

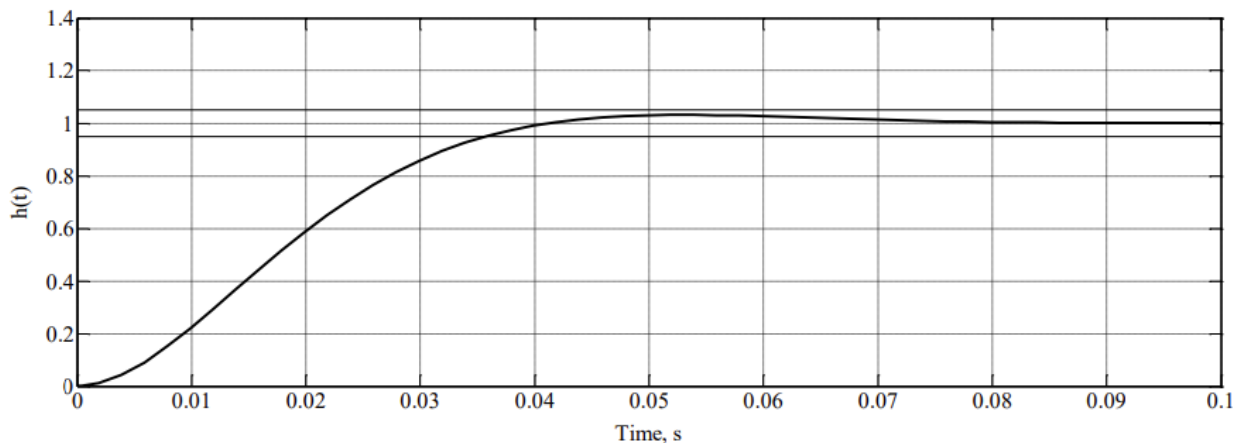


Рисунок 5.5 – Перехідна характеристика процесу управління

Синтезовані параметри моделі безперервного ПІД-регулятора моделі керування кроковим двигуном дорожнього принтера забезпечують задані показники якості перехідного процесу. Час регулювання складає 0,036 с. Перехідний процес відбувається без перерегулювання, що має велике значення для приводів систем з високою точністю руху виконавчих органів і є важливою властивістю для дорожнього принтера.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Технічні заходи захисту від ураження електричним струмом поділяються на дві основні групи. До першої відносяться: поділ електромереж, використання невисокої напруги, своєчасний контроль над ізоляцією, захисне заземлення, посилену ізоляцію (використання подвійної ізоляції) та інше. Використання таких заходів захисту дають людині максимальний захист від ураження електричним струмом. До другої групи віднесемо: захисне відключення та занулення.

Поділ електромереж. Для поділу електромережі використовують трансформатори. Вони дозволяють розбити загальний ланцюг на окремі ланцюги та ділянки (електрично не пов'язані між собою). В електромережах, де застосовується ізольована нейтраль, підвищується ізоляційний опір та знижується ємність щодо землі, порівнюючи з електромережею загалом. При поділі електромереж неприпустиме застосування автотрансформаторів.

Використання невисоких напруг електроживлення. Відповідно до ГОСТу, невисокою напругою вважається напруга до 42 В. Вона використовується з метою підвищення безпеки від ураження електрикою. Невисокі напруги зазвичай отримують за допомогою трансформаторів (знижуючих).

Ізоляція. Її контроль, виявлення ушкоджень, профілактика.

Контроль за станом ізоляційного покриття здійснюється шляхом періодичного виміру її опору. Метою цієї процедури є виявлення дефективних місць та своєчасне попередження коротких замикань на землю.

Захисне заземлення.

Захисним заземленням називається навмисне електричне з'єднання із землею (або її еквівалентом). Завдання заземлення є зниження значень напруги щодо землі. Воно використовується в електромережах з напругою до 1000 (з ізольованою нейтраллю). Захисне заземлення передбачає перерозподіл

падіннь напруги на ділянках електричного ланцюга: «корпус – земля» та «фаза – земля».

Використання подвійної ізоляції.

Під подвійною ізоляцією розуміється об'єднання робочої та додаткової ізоляції разом. Це значно підвищує загальну надійність захисту від ураження струмом. Електричне обладнання, яке робиться з такою ізоляцією, як правило, маркується особливими знаками. Ефективно себе виявляє подвійна ізоляція у різному електричному інструменті.

Застосування захисного вимкнення. Захисне відключення є досить ефективним заходом захисту від ураження електричним струмом. Воно є швидкодіючим захистом, що забезпечує передчасне автоматичне спрацьовування, тим самим відключаючи електроустаткування. Головні характеристики захисного відключення: струм спрацьовування та швидкодія.

Занулення. Захисне занулення, це навмисне (спеціальне) електричне з'єднання з нульовим провідником невідповідних металевих частин, які ненавмисно потрапляють під напругу (при несправностях, пробоях ізоляції тощо). Воно використовується в електромережах з напругою до 1000 В (з глухозаземленою нейтраллю). Основним завданням такого занулення є зниження ймовірності ураження електричним струмом людини при аварійному пробоях електрообладнання на корпус по одній із фаз електромережі.

Захисне заземлення - це навмисне електричне з'єднання із землею або її еквівалентом металевих невідповідних частин, які можуть опинитися під напругою.

Мета захисного заземлення - знизити до безпечної величини напругу щодо землі на металевих частинах обладнання, які не перебувають під напругою, але можуть опинитися під напругою через порушення ізоляції електроустановок. Внаслідок замикання на корпус заземленого обладнання

знижується напруга дотику і, як наслідок, струм, що проходить через тіло людини, при його дотику до корпусів.

Застосовується також заземлення електрообладнання, будівель та споруд для захисту від дії атмосферної електрики.

Захисне заземлення застосовується у трифазних трипровідних мережах напругою до 1000 В із ізольованою нейтраллю, а в мережах напругою 1000 В і вище – з будь-яким режимом нейтралі.

Заземлювальний пристрій - це сукупність заземлювача і провідників, що заземлюють, що з'єднують заземлювані частини електроустановки з заземлювачем.

Розрізняють природні та штучні заземлювачі.

Для заземлювальних пристроїв насамперед використовуються природні заземлювачі:

- водопровідні труби, що прокладені в землі;
- металеві конструкції будівель та споруд, що мають надійне з'єднання із землею;
- металеві оболонки кабелів (крім алюмінієвих);
- Обсадні труби артезіанських свердловин.

Забороняється як заземлювачі використовувати трубопроводи з горючими рідинами та газами, труби теплотрас.

У природних заземлювачах допускається приєднання до заземлювальної мережі щонайменше ніж у різних місцях.

Як штучні заземлювачі застосовують:

- Сталеві труби діаметром 3•5 см, товщиною стінок 3,5 мм,
- Довжиною 2 • 3 м;
- смугову сталь завтовшки не менше 4 мм;
- кутову сталь завтовшки не менше 4 мм;
- Пруткова сталь діаметром не менше 10 мм, довжиною до 10 м і більше.

Для штучних заземлювачів в агресивних ґрунтах (лужних, кислих та інших.), де вони піддаються посиленої корозії, застосовують мідь, омеднений чи оцинкований метал.

Як штучні заземлювачі не можна застосовувати алюмінієві оболонки кабелів, а також голі алюмінієві провідники, тому що в ґрунті вони окислюються, а окис алюмінію - це ізолятор.

Кожен окремий провідник, що знаходиться в контакті із землею, називається одиночним заземлювачем, або електродом. Якщо заземлювач складається з кількох електродів, з'єднаних між собою паралельно, він називається груповим заземлювачем.

Для занурення у землю вертикальних електродів попередньо риють траншею глибиною  $0,7 \cdot 0,8$  м, після чого забивають труби або куточки за допомогою механізмів. Сталеві стрижні діаметром 10-12 мм заглиблюють у землю за допомогою спеціального пристосування, а довші - за допомогою вібратора. Верхні кінці занурених у землю вертикальних електродів з'єднують сталеву смугою шляхом зварювання.

Влаштування захисного заземлення здійснюється двома способами: контурним розташуванням заземлюючих провідників і виносним.

При контурному розміщенні заземлювачів забезпечується вирівнювання потенціалів однофазного замикання на землю. Крім того, завдяки взаємному впливу заземлювачів зменшується напруга дотику і напруга кроку в зоні, що захищається. Виносні заземлення цими властивостями не мають. Зате при виносному способі розміщення є вибір місця для заглиблення заземлювачів.

У приміщеннях заземлювальні провідники мають у своєму розпорядженні таким чином, щоб вони були доступні для огляду та надійно захищені від механічних пошкоджень. На підлозі приміщень заземлюючі провідники укладають у спеціальні канавки. У приміщеннях, де можливе виділення їдких пар і газів, а також з підвищеною вологістю провідники, що заземлюють, прокладають уздовж стін на скобах в 10 мм від стіни.

Кожен корпус електроустановки приєднується до заземлювача або заземлюючої магістралі за допомогою окремого відгалуження. Послідовне включення кількох заземлюваних корпусів електроустановок у заземлювальний провідник забороняється.

Опір заземлювального пристрою є сумою опорів заземлювача щодо землі та заземлюючих провідників.

Опір заземлювача щодо землі є відношення напруги на заземлювачі до струму, що проходить через заземлювач у землю.

Величина опору заземлювача залежить від питомого опору ґрунту, в якому заземлювач знаходиться; типу розмірів та розташування елементів, з яких заземлювач виконаний; кількості та взаємного розташування електродів.

Величина опору заземлювачів змінюється у кілька разів залежно від пори року. Найбільший опір заземлювачі мають узимку при промерзанні ґрунту та в посушливий час.

Найбільше допустиме значення опору заземлення в установках до 1000 В: 10 Ом – при сумарній потужності генераторів і трансформаторів 100 кВт і менше, 4 Ом у всіх інших випадках.

Зазначені норми обґрунтовуються допустимою величиною напруги дотику, яка в мережах до 1000 не повинна перевищувати 40 В.

В установках понад 1000 В допускається опір заземлення  $R_3 \leq 125/I_3$  Ом, але не більше 4 Ом або 10 Ом.

В установках понад 1000 В з великими струмами замикання на землю опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 0,5 Ом для забезпечення автоматичного відключення ділянки мережі у разі аварії.

Заземленням показують навмисне електричне з'єднання із землею або її еквівалентним металевим невідповідним частинам, які під напругою. Захисне заземлення – основний технічний засіб, що застосовується в мережах із ізольованою нейтральною, фази на корпус проявляються у створенні паралельно з людиною шляху струму меншого опору.

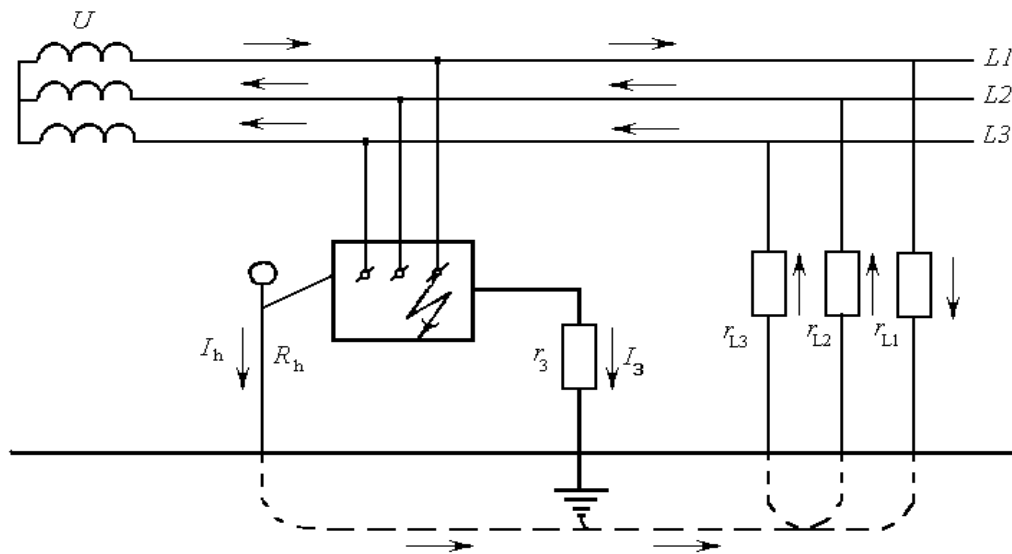


Рисунок 6.1 – Схема мережі із ізольованою нейтраллю та захисним заземленням електроустановки

За відсутності захисного заземлення та пробією ізоляції корпус електроустановки виявляється під напругою і дотик до нього буде так само небезпечним, як і до фази. Захисне заземлення електроустановок виконуються при номінальній напрузі 110 - 440 В постійного струму при роботах в умовах підвищеної небезпеки.

Заземлення підлягають трансформатори, металеві огорожі частин, що знаходяться під напругою. Заземлення здійснюють за допомогою заземлювального пристрою, що складається із заземлювача та заземлюючих провідників. Заземлювачем називають металевий провідник, що у безпосередньому зіткненні із землею. Розрізняють заземлювачі природні та штучні. У нашому випадку застосовуються природні заземлювачі, тобто прокладені під землею металеві труби та трубопроводи. Заземлювальні провідники прикріплюють до магістралі лише зварюванням, а до корпусів електроустановки – звареними чи надійними болтовими з'єднаннями

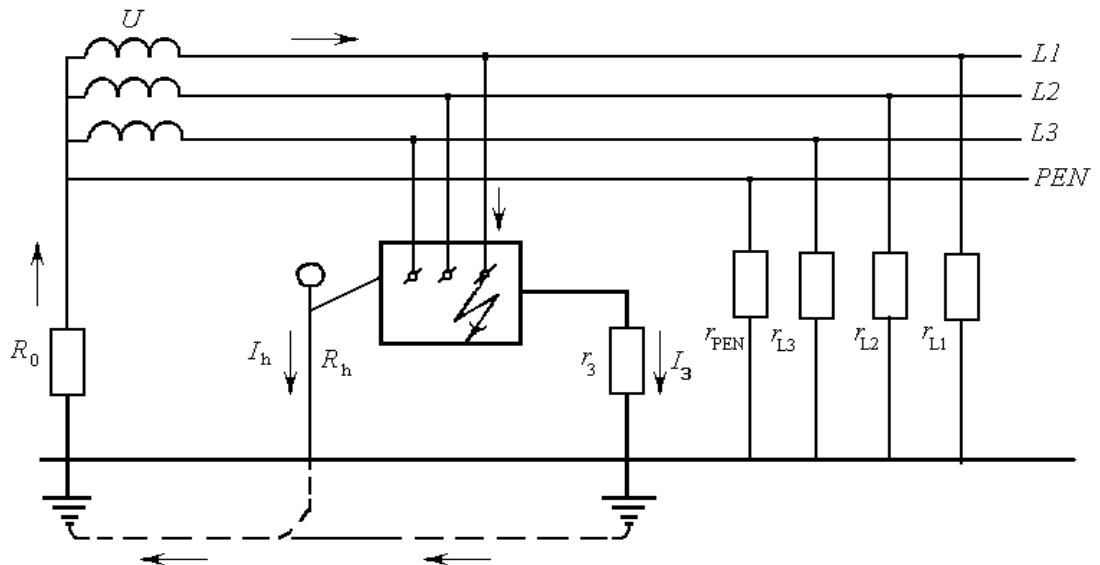


Рисунок 6.2 – Схема мережі із заземленою нейтраллю та захисним заземленням споживача електроенергії

Опір заземлювального пристрою повинен бути не більше  $4 \cdot 8$  Ом при міжфазній напругі  $220 \cdot 380$ В трифазного джерела живлення.

Відповідно до Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів та Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів опір заземлення вимірюють не рідше одного разу на рік у періоди найменшої провідності.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання атестаційної роботи проведено аналізу досліджені всі існуючих систем багатокольорового (друку кількома філаментами) 3D друку за технологією FDM/FFF. У якості аналогу обрано систему із екструдерами, що перемикаються (tool changer). Проведено аналіз існуючих аналогів та запропановано власний метод фіксації екструдера на каретці принтер – за допомогою електромагніту. Запропонована система відповідає вимогам технічного завдання: можливість одночасного друку п'ятьма пластиками та мінімізація відходів в процесі друку.

У третьому розділі наведено 3D модель системи, що розроблено. Її умовно поділено на три функціональні блоки: блок каретки, блок екструдера та тримач екструдера. Наведено та описано основні параметри нестандартних деталей та компонентів. Наведено ескіз, описано обраний матеріал та технологію виготовлення. Також описано та проілюстровано принцип роботи системи.

У четвертому розділі проведено комп'ютерну симуляцію механічних навантажень, що діють на систему в процесі 3D друку. Проведено статичну симуляцію для перевірки наявності деформацій та зміщень елементів системи. Максимальні зміщення склали  $0,2952 \cdot 10^{-6}$  мм, що повністю задовільняє задачі системи. Також проведено симуляцію динамічних навантажень (вібрацій), що виникають у процесі друку. Знайдено резонансну частоту системи, яка склала 1876,926 Гц, що набагато більше ніж заявлена у літературі частота вібрацій більшості стандартних FDM/FFF 3D принтерів. Таким чином вібрації, що виникають в процесі друку не будуть значно впливати на міцність захвату екструдера і якість самого 3D друку.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

2. Невлюдов, І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч. посіб. / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 320с.

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В. Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.

4. Additive Manufacturing. Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. Springer Science+Business Media New York 2019, 510 p.

5. Pro3d – Перспективи 3D друку [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://pro3d.com.ua/a359983-yaki-perspektivi-druku.html](http://www.pro3d.com.ua/a359983-yaki-perspektivi-druku.html).

6. 3D4u – Переваги та недоліки 3D друку [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/101-preimusshestva-i-nedostatki-3d-pechati](http://www.3d4u.com.ua/uk/blog/post/101-preimusshestva-i-nedostatki-3d-pechati).

7. All3DP – 3D printing technology [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/#section-material-extrusion](http://www.all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/#section-material-extrusion).

8. Deepak Kandepet – Marlin 3D printer firmware: Delta inverse kinematics [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: <https://kandepet.com/marlin-3d-printer-firmware-delta-inverse-kinematics/>.

9. RepRap [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: <https://reprap.org/wiki/RepRap>.

10. E3D [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: <https://e3d-online.com/blogs/news/tc-discontinued>

11. Tool Changer [Електронний ресурс] /– Режим доступу: www / URL: [https://www.doublejumpelectric.com/projects/toolchanging\\_pen\\_plotter /2019-03-17-toolchanging\\_pen\\_plotter/](https://www.doublejumpelectric.com/projects/toolchanging_pen_plotter /2019-03-17-toolchanging_pen_plotter/)

12. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Безпека праці в індустрії інформаційних технологій для студентів усіх спеціальностей очної форми навчання / Упоряд.: Г.В. Пронюк, Т.Є. Стиценко, Н.М. Сердюк. Харків: ХНУРЕ, 2018. 36 с