

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

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Розроблення полярного 3D принтера з можливістю друку деталі без  
технологічних підтримок для роботизованого виробництва  
(тема)

Виконав:  
здобувач 2024 року навчання,  
групи КТРСм-23-2

Кальченко Антон Сергійович  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютеризовані та  
роботизовані системи  
(повна назва освітньої програми)

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

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	АКТ
Кафедра	КІТАР
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (код і повна назва)
Тип програми	Освітньо-професійна (освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма	Комп'ютеризовані та роботизовані системи (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Кальченку Антону Сергійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Розроблення полярного 3D принтера з можливістю друку  
деталі без технологічних підтримок для роботизованого виробництва  
затверджена наказом університету від \_\_\_\_\_ 25.11.2024 р. № 1239 Ст
- Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 21.01.2025 р.
- Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_
  - Циліндрична система координат принтеру;
  - Додаткова ось обертання екструдеру;
  - Діаметр робочої зони 300 мм
- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_
  - Вступ;
  - Аналіз особливостей підтримок у FFF/FDM 3D друці;
  - Розробка полярного 3D принтеру;
  - Адаптація mesh файлів для друку без підтримок;
  - Охорона праці;

#### 4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) \_\_\_\_\_  
 Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(\*.ppt) формату А4 – 15 с.А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

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

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технології FDM/FFF 3D друку	20.05.2024	виконано
2	Аналіз типів підтримок	10.06.2024	виконано
3	Аналіз технологій друку без підтримок	30.06.2024	виконано
4	Розробка конструкції полярного 3D принтеру	31.08.2024	виконано
5	Розробка 3D моделі полярного 3D принтеру	15.10.2024	виконано
6	Аналіз структури mesh файлів	30.11.2024	виконано
7	Розробка математичної моделі адоптації STL файлів	31.01.2024	виконано
8	Розробка програмного забезпечення для адоптації STL файлу	15.12.2024	виконано

Дата видачі завдання 30.04.2024 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. каф. КІТАР Разумов-Фризюк Є  
(посада, 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.

“15” грудня 2024 р.



Кальченко А.С.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 105 с., 83 рис., 2 дод., 18 джерел.

3D ПРИНТЕР, ПІДТРИМКИ, САМ СИСТЕМИ, MESH ФАЙЛИ.

Мета роботи – розроблення конструкції 3D принтеру для друку без підтримок.

Об’єкт дослідження – технологія екструзійного 3D друку.

Предмет дослідження – технологічні елементи екструзійного 3D друку, що генеруються САМ системами.

Виконано розробку конструкції полярного FFF/FDM 3D принтеру з додатковою поворотною віссю, що друкує без підтримок. Запропоновано адаптацію mesh файлів для забезпечення можливості використання звичайних САМ систем.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 12 – "Відповідальне споживання та виробництво", а саме п. 12.4: "Зменшити обсяг утворення відходів". Полярний 3D принтер, розроблений у рамках цієї роботи, не потребує використання технологічних підтримок, що дозволяє суттєво зменшити вартість виробництва, мінімізувати утворення відходів і повністю прибрати необхідність їх переробки. Завдяки інноваційній технології принтер сприяє підвищенню ефективності роботизованого виробництва та відповідає вимогам сталого розвитку.

## ABSTRACT

Explanatory note: 105 p., 83 figures, 2 appendix, 18 sources.

3D PRINTER, SUPPORTS, SYSTEMS ITSELF, MESH FILES.

The purpose of the work is to develop the design of a 3D printer for printing without supports.

The object of development is extrusion 3D printing technology.

The subject of development is the technological elements of extrusion 3D printing generated by CAM systems.

The design of a polar FFF/FDM 3D printer with an additional rotary axis that prints without supports has been developed. The adoption of mesh files is proposed to ensure the possibility of using conventional CAM systems.

Additionally, the results of this work can be attributed to Sustainable Development Goal 12 – "Responsible Consumption and Production," specifically target 12.4: "Reduce waste generation." The polar 3D printer developed as part of this work does not require the use of technological supports, which significantly reduces production costs, minimizes waste generation, and completely eliminates the need for waste recycling. Through its innovative technology, the printer enhances the efficiency of robotic manufacturing and aligns with the principles of sustainable development.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз особливостей підтримок у FFF/FDM 3D друці.....	11
1.1 Види підтримок .....	11
1.2 Налаштування підтримок у САМ системах .....	17
1.3 Матеріали підтримок .....	20
1.4 Друк без підтримок .....	22
1.5 Висновки до першого розділу.....	28
2 Розробка полярного 3D принтеру.....	29
2.1 Аналіз вибору циліндричної системи координат .....	29
2.2 Розробка конструкції 3D принтеру .....	32
2.3 Корпус .....	34
2.4 Ось Z.....	45
2.5 Ось R.....	47
2.6 Ось $\alpha$ .....	58
2.7 Ось $\theta$ .....	70
2.8 Висновки до другого розділу .....	75
3 Адаптація mesh файлів для друку без підтримок .....	76
3.1 Структура mesh файлів.....	76
3.2 Розробка алгоритму адоптації mesh файлів .....	85
3.3 Математичні методи перетворення mesh файлів.....	88
3.4 Висновки до третього розділу .....	94
4 Моделювання роботи крокового двигуна осі $\theta$ .....	96
4.1 Розробка моделі крокового двигуна осі $\theta$ .....	96
4.2 Охорона праці.....	102
Висновки .....	106
Перелік посилань.....	108
ДОДАТОК А Апробація наукових результатів дослідження.....	111
ДОДАТОК Б Демонстраційний матеріал у вигляді презентації .....	125

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ПЗ – програмне забезпечення;

CAD – Computer–aided design;

CAM – Computer–aided manufacturing;

OBJ – Object;

STL – Stereolithography.

## ВСТУП

3D–друк, або адитивне виробництво, набирає популярності і стає все більш актуальним в різних галузях. Його актуальність можна пояснити кількома ключовими факторами:

– економія ресурсів і час: 3D–друк дозволяє швидко створювати прототипи, що суттєво скорочує час розробки нових продуктів. Це особливо важливо в автомобільній та авіаційній галузях, де потрібно тестувати деталі перед серійним виробництвом;

– індивідуалізація продуктів: завдяки можливості створення унікальних і складних форм, 3D–друк стає популярним у медицині (виробництво протезів, імплантів), моді та ювелірних виробках;

– зниження витрат: адитивні технології дозволяють знизити витрати на виробництво дрібносерійної продукції, особливо для малих підприємств, які не мають доступу до дорогого обладнання;

– екологічність: на відміну від традиційних методів виробництва, 3D–друк використовує тільки необхідну кількість матеріалів, що знижує кількість відходів;

– освіта і творчість: 3D–принтери активно використовуються в навчальних закладах для розвитку інженерних і творчих навичок у студентів.

Технологія стає дедалі доступнішою і поширеною, що відкриває нові можливості для інновацій у різних сферах життя.

Однією з найбільших проблем сучасного 3D друку залишається зменшення кількості або повне позбавлення технологічних підтримок, що дозволить економити як матеріали так і час виробництва.

Мета роботи – розроблення конструкції 3D принтеру для друку без підтримок.

Об’єкт дослідження – технологія екструзійного 3D друку.

Предмет дослідження – технологічні елементи екструзійного 3D друку, що генеруються САМ системами.

Робота виконана згідно [1–3].

# 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПІДТРИМОК У FFF/FDM 3D ДРУЦІ

## 1.1 Види підтримок

FDM (Fused Deposition Modeling) – це одна з найпопулярніших технологій 3D-друку, в якій пластикова нитка (філамент) плавиться та наноситься пошарово для створення тривимірних об'єктів. Однак при друкуванні складних моделей, особливо з нависаючими елементами, можуть виникнути проблеми з деформацією та порушенням геометрії. Саме тут на допомогу приходять підтримки (supports) – тимчасові структури, які допомагають стабілізувати модель у процесі друку (рисунок 1.1) [4].



Рисунок 1.1 – Підтримки FDM 3D друку

Підтримки необхідні в ситуаціях, коли модель має частини, що нависають (елементи з кутом більше 45 градусів щодо основи), порожнечі або складні внутрішні форми. Без них шари пластику можуть не встигнути застигнути належним чином, що призведе до провисання, деформації або руйнування елементів моделі.

Підтримки можуть виконувати декілька основних задач [5]:

- підтримка нависаючих елементів – запобігання провисанню шарів у місцях, де модель не може сама забезпечити собі опору;
- стабілізація тонких та довгих елементів – зменшення вібрацій та зсувів, які можуть статися під час друку високих та тонких структур;
- забезпечення адгезії – підвищення зчеплення моделі з платформою у випадках, коли площа контакту з робочою поверхнею є недостатньою для стійкості.

Залежно від геометрії моделі та вимог до якості, існує кілька основних типів підтримок, кожен із яких має свої особливості [6].

Лінійні (Line Supports) підтримки є вертикальними лініями, що розташовуються під кутом до поверхні моделі. Вони створюють досить просту структуру, яка легко видаляється та потребує мінімальних витрат матеріалу (рисунок 1.2).

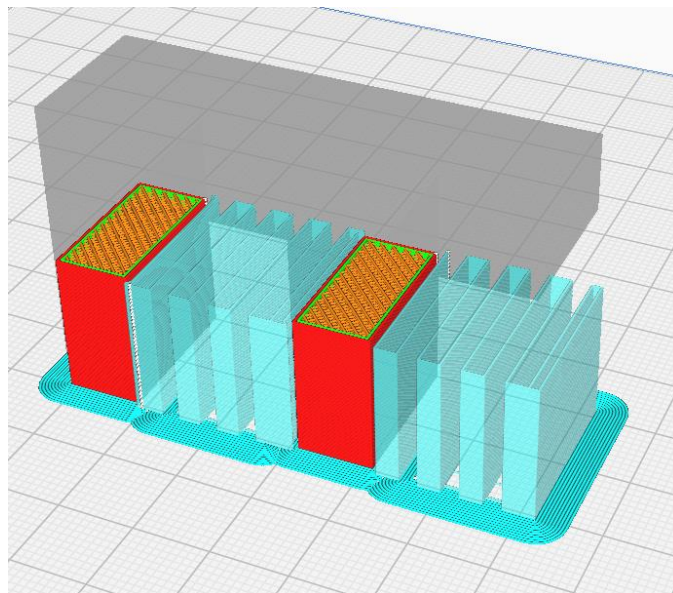


Рисунок 1.2 – Лінійні (Line Supports) підтримки в САМ системі

Переваги:

- простота налаштування та друку;
- легке видалення;
- економія матеріалу.

Недоліки:

- не забезпечують хорошу підтримку для складних чи важких елементів;
- можливі дефекти на місці контакту з моделлю.

Лінійні підтримки застосовуються в основному для невеликих нависаючих елементів або коли потрібний швидкий та економний друк.

Гратчасті підтримки (Grid Supports) утворюються сітчастою структурою з лініями, що перехрещуються. Це один із найпопулярніших видів підтримок, який пропонує більш міцну та надійну опору порівняно з лінійними (рисунок 1.3).

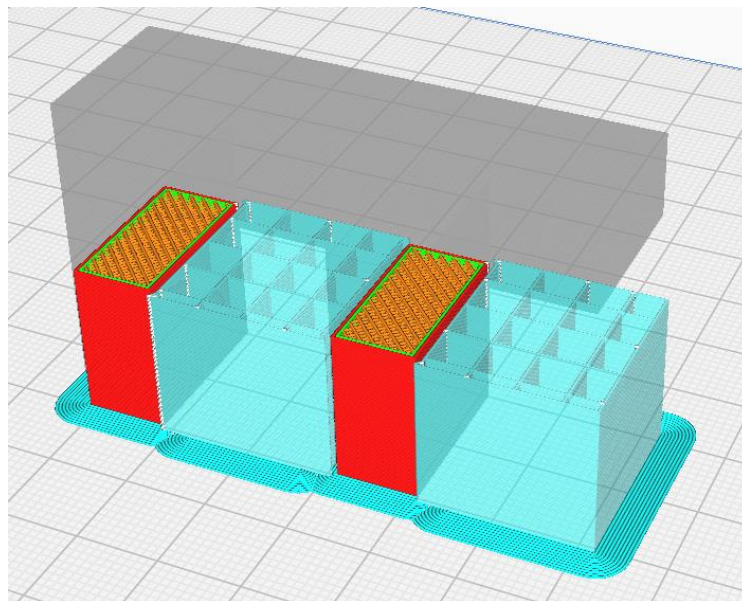


Рисунок 1.3 – Гратчасті підтримки (Grid Supports) в САМ системі

Переваги:

- надійна підтримка навіть для складних геометрій;
- легкість видалення, якщо налаштовано правильний зазор.

Недоліки:

- вища витрата матеріалу;
- можливі сліди від підтримки поверхні моделі.

Гратчасті підтримки використовуються для складних моделей з великими нависаючими елементами або під час друку деталей, що потребують точності.

Деревоподібні підтримки (Tree Supports) нагадують розгалужену структуру дерева: вони піднімаються від платформи, а їхні гілки доходять до точок нависання на моделі. Цей вид підтримки ефективний при мінімальному контакті з моделлю, що знижує ймовірність пошкодження поверхні (рисунок 1.4).

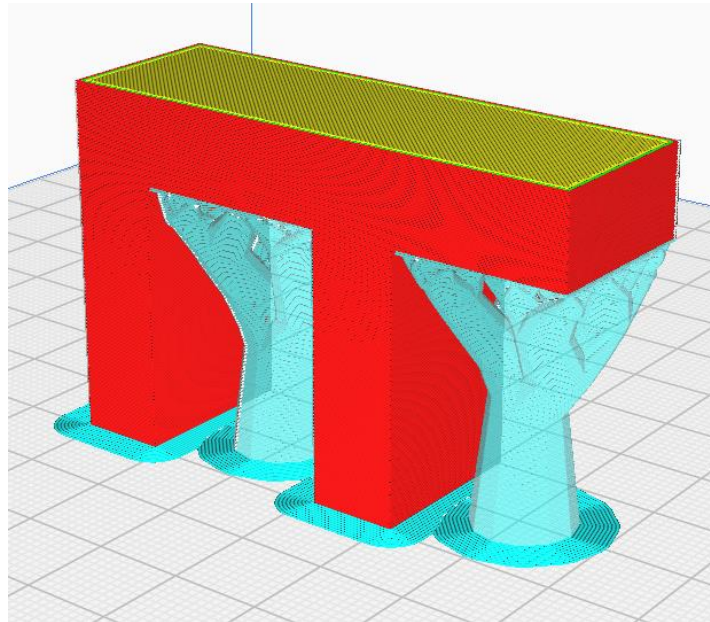


Рисунок 1.4 – Деревоподібні підтримки (Tree Supports) в САМ системі

Переваги:

- економія матеріалу;
- менше точок контакту, що знижує ризик пошкодження моделі;
- легкість видалення.

Недоліки:

- труднощі налаштування, особливо для складних моделей;
- можуть бути менш стійкими до великих елементів.

Цей тип підтримок часто використовується для фігурок, декоративних елементів та інших моделей, де важливим є зовнішній вигляд та мінімізація слідів від підтримок.

Суцільні підтримки (Solid Supports) є щільною масою матеріалу, що підтримує модель по всій площі контакту. Це один із найміцніших і найнадійніших типів підтримок, але він також є найбільш ресурсом.

Переваги:

- максимальна стійкість та міцність;
- підходить для важких та складних моделей.

Недоліки:

- велика витрата матеріалу;
- складність видалення;
- тривалий час друку.

Суцільні підтримки використовуються для друку дуже важких моделей, а також у випадках, коли потрібна максимальна точність (рисунок 1.5).

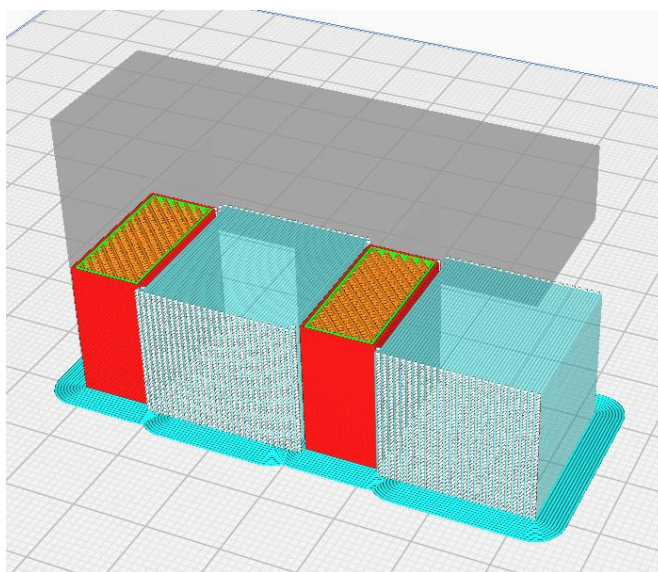


Рисунок 1.5 – Суцільні підтримки в САМ системі

Точкові підтримки (Point Supports) характеризуються мінімальними точками контакту з моделлю. Він використовується для тонких елементів, які вимагають підтримки, але не потребують повної підтримки (рисунок 1.6).

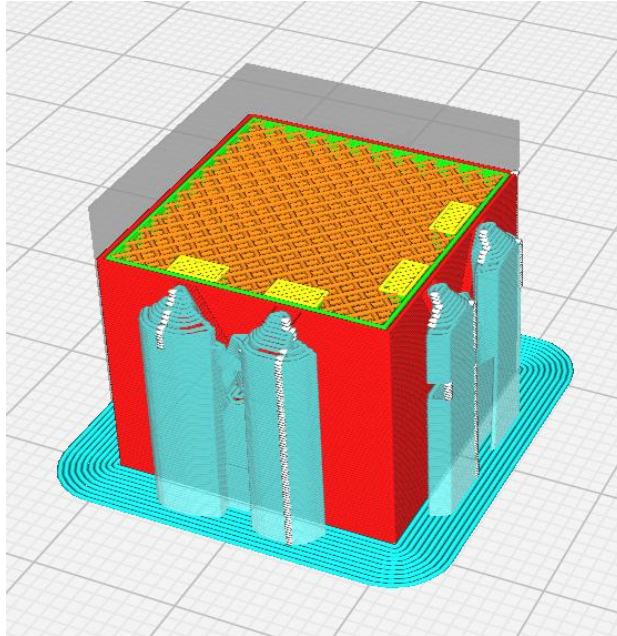


Рисунок 1.6 – Точкові підтримки (Point Supports) в САМ системі

#### Переваги:

- мінімальні сліди на моделі;
- легкість видалення.

#### Недоліки:

- підходить лише для невеликих елементів;
- може не витримувати більших чи важчих структур.

Підтримки з використанням спеціальних матеріалів. Деякі 3D-принтери підтримують використання двох екструдерів, що дозволяє друкувати модель з одного матеріалу, а підтримки з іншого. Наприклад, можна використовувати водорозчинні матеріали (PVA) або матеріали, що розчиняються в D-Limonen (HIPS), для подальшого їх легкого видалення.

Переваги:

- повне видалення без слідів на моделі;
- зручність для складних внутрішніх структур.

Недоліки:

- додаткові витрати на матеріали;
- необхідність використання принтера із двома екструдерами.

Налаштування параметрів підтримки

## 1.2 Налаштування підтримок у САМ системах

При налаштуванні підтримки важливо враховувати кілька ключових параметрів, які безпосередньо впливають на якість друку, час роботи та витрату матеріалу.

Кут нависання – один із найважливіших параметрів налаштування підтримок. Під кутом нависання в САМ системах мається на увазі кут, що утворює бічна поверхня виробу, що друкується, відносно нормалі до платформи друку (рисунок 1.7). Зазвичай підтримки створюються для елементів з кутом нахилу не менше ніж 45 градусів.

Цей параметр можна змінювати в залежності від складності моделі:

- 0–30 градусів: зазвичай не вимагають підтримки, тому що шари можуть підтримувати самі себе;
- 45 градусів: критичний кут, при якому матеріал починає провисати, та рекомендується використовувати підтримки;
- більше 45 градусів: необхідно ретельно перевіряти необхідність додавання підтримки для збереження форми моделі.

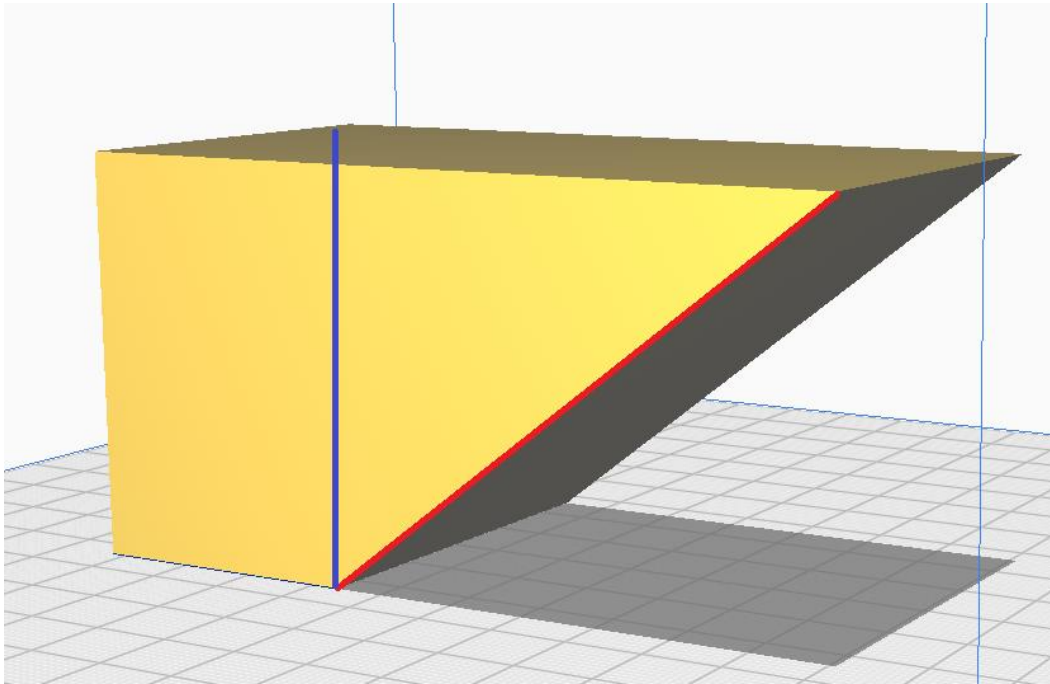


Рисунок 1.7 – Кут нависання

Щільність підтримок впливає на те, наскільки часто лінії підтримок будуть розташовуватися одна щодо одної. Чим вище щільність, тим міцніше буде підтримка, але при цьому зросте витрата матеріалу та час друку:

- низька щільність (10–15%) використовується для невеликих та легких моделей;
- середня щільність (15–30%) застосовується для більшості моделей з нависаючими елементами;
- висока щільність (понад 30%) рекомендується для важких і складних моделей, що потребують максимальної підтримки.

Вигляд кожного типу щільності можна побачити на рисунку 1.8

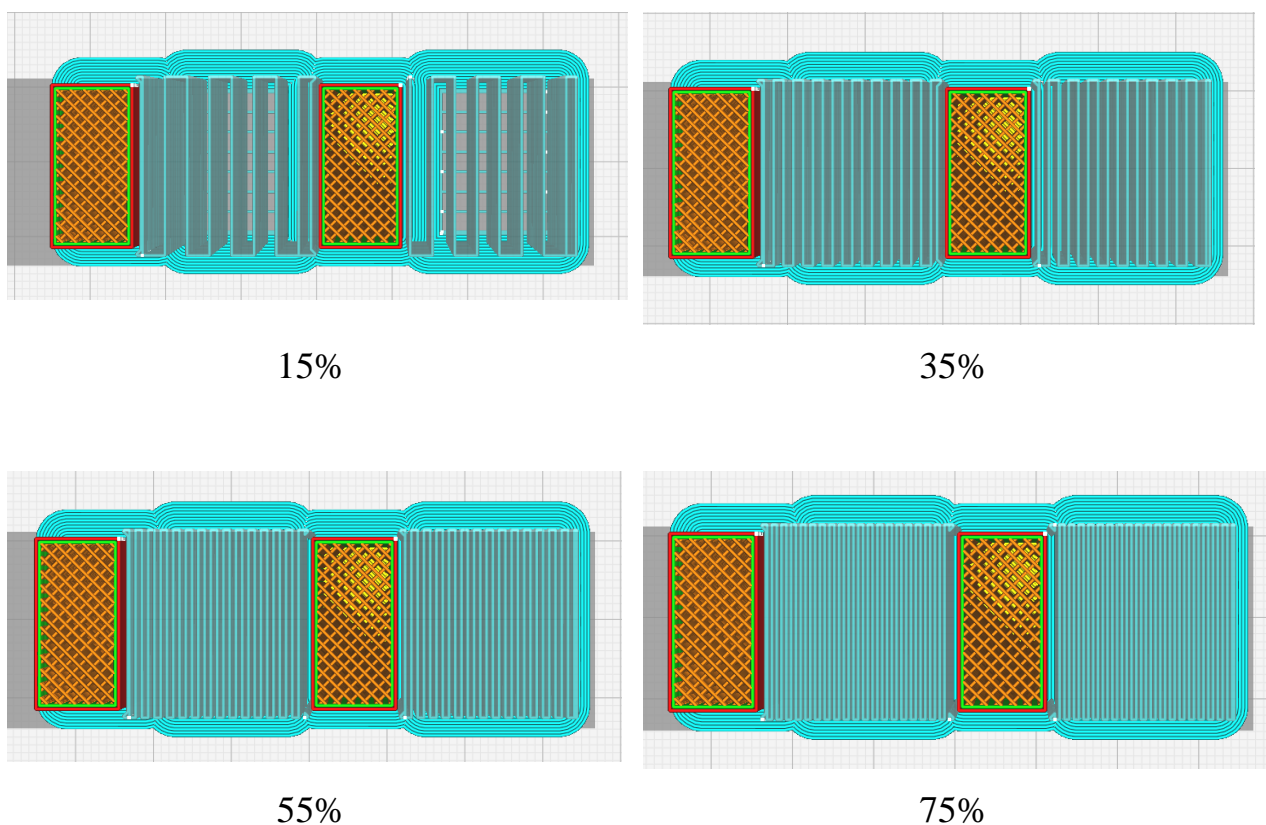


Рисунок 1.8 – Щільність підтримок

Відступ від моделі (Z-відступ), цей параметр задає відстань між підтримкою та поверхнею моделі. Невеликий проміжок дозволяє легко видалити підтримку після друку, але при надто великому проміжку часу підтримка може не виконувати належним чином. Виділяють наступні діапазони відступів:

- 0,1–0,2 мм, стандартний зазор для більшості моделей;
- менше 0,1 мм, застосовується для моделей з дуже високою точністю;
- більше 0,2 мм, використовується для легкого видалення підтримки, але збільшує ризик деформації нависаючих елементів.

Тип контакту підтримки з моделлю також важливий для забезпечення легкості видалення та мінімізації слідів:

- повний контакт: підтримка стосується моделі всією своєю площею. Цей метод забезпечує максимальну стійкість, але залишає видимі сліди;
- мінімальний контакт: підтримка стосується моделі в мінімальних точках, що полегшує видалення, але робить конструкцію менш стійкою.

Положення підтримки, підтримки можуть бути налаштовані так, щоб перебувати або тільки із зовнішнього боку моделі, або як із зовнішнього, так і внутрішнього боку (наприклад, для складних моделей із порожнинами):

- зовнішні підтримки: простіше у видаленні та забезпечують чисту внутрішню структуру моделі;

- внутрішні та зовнішні: необхідні для моделей з внутрішніми нависаючими елементами, такими як канали та порожнини.

### 1.3 Матеріали підтримок

У якості матеріалів підтримок можуть бути як основні матеріали, що використовуються для друку виробу (ABS, PLA, PET та інші), так і спеціалізовані матеріали, що хімічно розчиняються у рідинах, до яких основні матеріали є стійкими. До спеціальних розчинних матеріалів можна віднести: PVA, HIPS, BVON.

Друк підтримок основним матеріалом має багато переваг:

- зазвичай основні матеріали мають меншу вартість ніж спеціалізовані матеріали підтримок;

- для друку підтримок основним матеріалом достатньо одного екструдеру/сопла, таким чином їх друк можливий на найдешевших моделях 3D принтерів;

- у випадку потрапляння частинок матеріалу підтримки в матеріал виробу, не виникає дефектів і браку.

Але разом із тим є і значний недолік: через те що для друку виробу і підтримок використовується один матеріал, між ними виникає висока кодгезія, що ускладнює процес видалення підтримок.

PVA (полівініловий спирт) – це водорозчинний матеріал, який ідеально підходить для використання як підтримки. Він часто використовується на 3D–

принтерах із двома екструдерами, де модель друкується одним матеріалом, а підтримки – PVA.

PVA має наступні переваги:

– легкість видалення: PVA легко розчиняється у воді, що робить його ідеальним для складних моделей з внутрішніми порожнинами та нависаючими елементами;

– сумісність із PLA: PVA добре поєднується з PLA, що робить його популярним вибором для друку моделей із PLA основою.

Також існує перелік недоліків:

– висока вартість: PVA дорожче, ніж багато інших матеріалів підтримки;

– чутливість до вологи: PVA швидко вбирає вологу з повітря, що може утруднити його використання, якщо матеріал не зберігається належним чином;

– складність друку: PVA може бути складним у налаштуванні, оскільки вимагає точного контролю температури та швидкості друку.

PVA ідеальний для складних моделей, особливо коли є внутрішні порожнини або складні геометричні форми, де механічне видалення підтримок неможливе або вкрай важко.

HIPS (високоударний полістирол) – це розчинний у розчині лимонної кислоти матеріал, який часто використовується у поєднанні з ABS. Він має схожі з ABS властивостями, але може бути розчинений для полегшення видалення підтримок.

HIPS має наступні переваги:

– розчинність: HIPS можна розчинити в лимонені, що робить його чудовим вибором для складних моделей з нависаючими елементами;

– міцність: HIPS міцний і може бути використаний для підтримки моделей, що вимагають жорсткості та стійкості.

Також існує перелік недоліків:

– використання розчинника: розчин лимонної кислоти із домішками може призвести до подразнень очей та шкіри при контакті;

– вартість: HIPS може бути дорожчим, ніж матеріали, що не вимагають розчинення;

– сумісність: HIPS найкраще підходить для використання з ABS, але може не поєднуватись з іншими матеріалами.

HIPS часто застосовується для друку моделей з ABS, особливо у випадках, коли потрібне розчинення підтримок для полегшення їх видалення.

BVOH (бутендіолвініловий спирт) – це відносно новий водорозчинний матеріал для підтримки, який конкурує з PVA завдяки кращим характеристикам розчинення та сумісності з різними філаментами.

BVOH має наступні переваги:

– швидке розчинення: BVOH розчиняється швидше за PVA, що скорочує час постобробки;

– сумісність: BVOH добре сумісний з PLA, ABS та PETG;

– найменша чутливість до вологи на відміну від PVA, BVOH менш схильний до деградації при контакті з вологою.

Також існує перелік недоліків:

– висока вартість: BVOH є одним із найдорожчих матеріалів для підтримки;

– обмежена доступність: незважаючи на його переваги, BVOH ще не настільки поширений, як PVA.

BVOH особливо корисний для складних моделей, де потрібне швидке та просте видалення підтримки. Він добре підходить для професійних проектів та ситуацій, коли час постобробки критичний.

#### 1.4 Друк без підтримок

Підтримки в FFF/FDM 3D друці є необхідністю, але в процесі підготовки 3D моделі до друку інженер намагається мінімізувати їх кількість. Це пов'язано із високою вартістю спеціалізованих матеріалів підтримки, збільшенням витрат

часу на друк або складністю їх видалення та постобробки поверхні, що з ними контактувала. Існує два основних шляхи зменшення кількості підтримок або їх повного позбавлення. Перший – це адаптація 3D моделі до особливостей технології FFF/FDM 3D друку, другий – зміна класичного підходу до самої технології або конструкції 3D принтеру.

Існує декілька способів адаптації моделі до 3D друку:

– оптимізація орієнтації моделі. Одним із найпростіших та найефективніших способів уникнути підтримки є правильна орієнтація моделі на платформі. Якщо розмістити модель так, щоб елементи, що нависають, були мінімальними, або поворотом змінити їх положення, можна значно зменшити потребу в підтримках. Наприклад, деталь із кутами менше 45 градусів можна роздрукувати без підтримки;

– використання кута нахилу до 45 градусів. Більшість FDM–принтерів здатні успішно друкувати шари із кутами нахилу до 45 градусів без використання підтримок. Це пов'язано з тим, що шари, що накладаються з таким кутом, встигають застигнути та підтримувати наступні шари. Дизайнери можуть модифікувати моделі, зберігаючи кути елементів у межах цього кордону, щоб уникнути необхідності додавати підтримку;

– проектування з урахуванням нависаючих елементів. Методи проектування, такі як додавання скосів (або фасок) під кутами, можуть зробити модель, що самопідтримується. Замість різких кутів та плоских виступів дизайнери можуть додавати плавні переходи та похилі поверхні, які дозволять друкувати без підтримки;

– дизайн із використанням мостів. "Мостами" в 3D–друку називають короткі горизонтальні сегменти між двома точками, що підтримуються. У FDM–друку принтери можуть друкувати мости певної довжини без підтримки, якщо правильно налаштувати параметри друку, такі як швидкість охолодження та швидкість екструдера. Це корисно для моделей із невеликими виступами;

– поділ моделі на частини. Якщо модель надто складна для друку без підтримки, один із методів – це поділ її на кілька частин. Кожна частина може

бути спроектована так, щоб друкуватись без підтримки, а потім елементи з'єднуються за допомогою клею або клямок;

– використання спеціальних програм для створення підтримки тільки в критичних точках. Сучасні програми для нарізки (слайсери), такі як Cura або Simplify3D, можуть створювати мінімальні підтримки тільки там, де це необхідно. Наприклад, можна налаштувати програму так, щоб підтримки друкувалися тільки в місцях з дуже різкими кутами або важкими нависаючими елементами, залишаючи решту моделі вільною від підтримки.

Але, нажаль дані способи не завжди є дієвими. Іншим способом є зміна класичного підходу до самої технології або конструкції 3D принтеру.

Першим таким способом є створення дугових поверхонь, що нависають. Даний підхід дозволяє обмежено друкувати горизонтальні поверхні без підтримок. Ідея запропонована Steven McCulluch, який створив скрипт для створення частин g-коду для друку поверхонь, де необхідні підтримки (рисунок 1.9) [7].

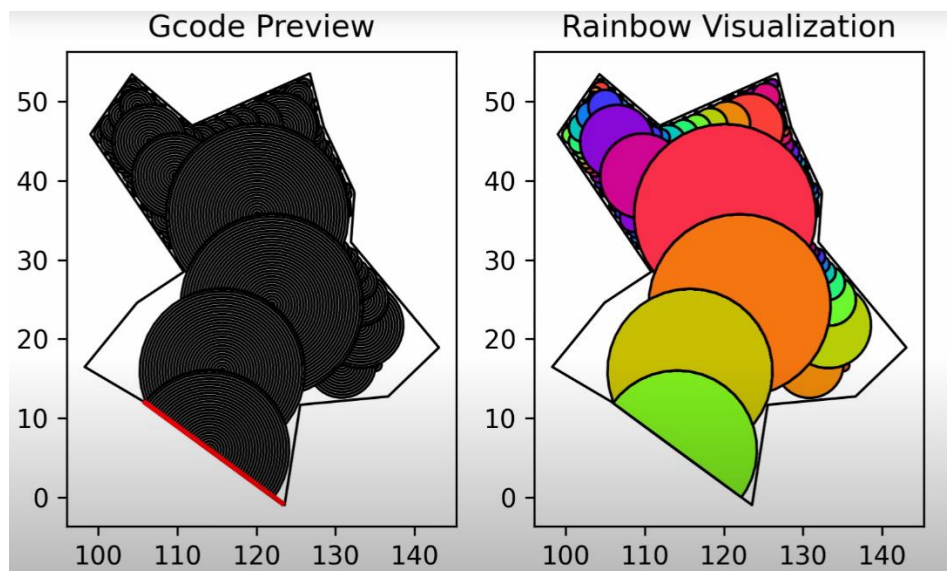


Рисунок 1.9 – Візуалізація скрипту поверхонь, що нависають

Даний скрипт дозволяє обмежено друкувати поверхні із кутом нависання  $90^\circ$ . Через силу поверхневого натягіння дугові елементи мають меншу тенденцію до горизонтального зміщення під дією сил тяжіння (рисунок 1.10).

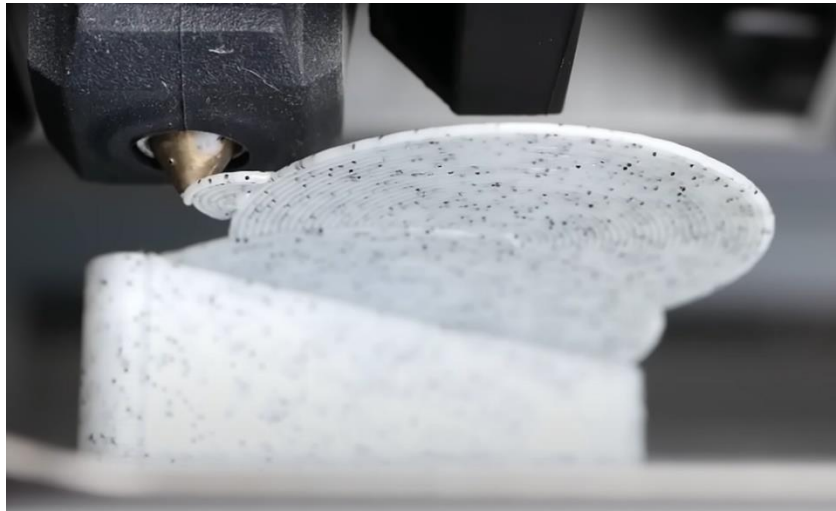


Рисунок 1.10 – Застосування скрипту Steven McCulluch

Дана методика працює лише при невеликих розмірах поверхонь, що нависають.

Другим способом є друк параболічними поверхнями – шарами. Якщо у класичному вигляді FFF/FDM друці екструзія відбувається плоскими шарами, що накладаються один на одного, то даний спосіб розділяє модель не на плоскі шари, а на конічні (рисунок 1.11).

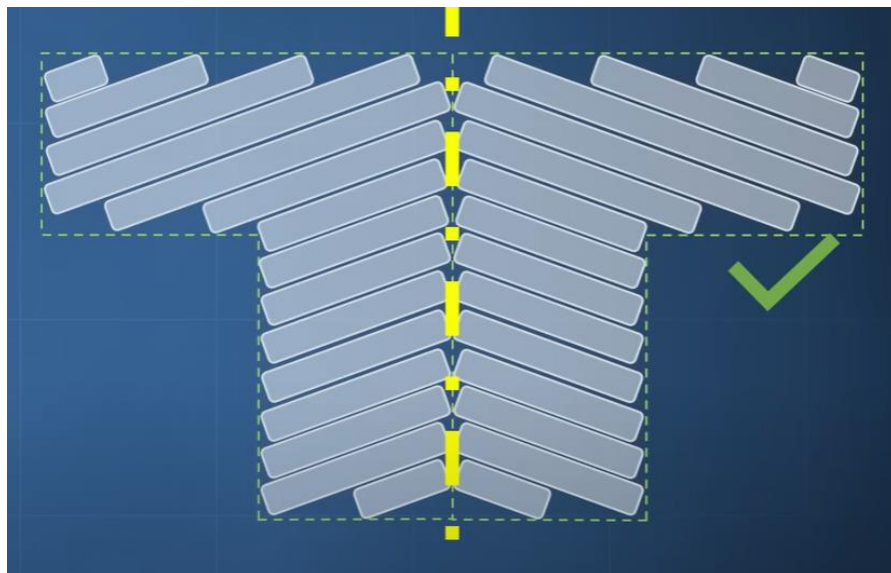


Рисунок 1.11 – Слайсінг моделі конічними поверхнями

Даний метод дозволяє також друкувати на звичайних 3D принтерах, без зміни конструкції (рисунок 1.12) [8].

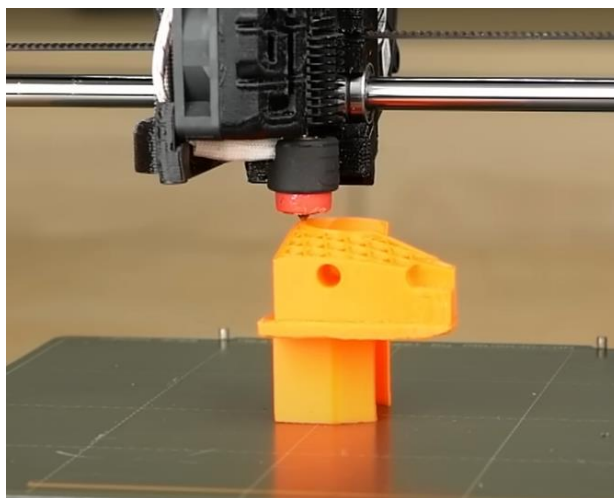


Рисунок 1.12 – Друк конічними шарами

За допомогою друку конічними шарами можливо друкувати поверхні, що нависають більших розмірів. Це досягається тим, що нижня площина «зміцнюються» за рахунок кодгезії до попередніх шарів під кутом. Слайсінг відбувається у стандартних САМ–системах, але 3D модель має бути експортовано у так звану конічну форму (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Експорт моделі для конічного друку

Але існують і певні обмеження. Через габаритні розміри hot-end'у екструдеру друк можливий лише під великим кутом відносно нормалі до платформи друку, через що великі похилі поверхні також будуть деформовані.

Для збільшення розмірів похилих поверхонь необхідно виконувати друк під кутом наближеним до  $45^\circ$ , що у свою чергу вимагає зміни конструкції 3D принтеру. У даному випадку необхідно забезпечити додаткову ось повороту навколо вертикальної осі (рисунок 1.14). Таким чином для такого типу друку необхідні так звані 3,5 осьові 3D принтери.

Такий тип друку без підтримок дозволяє друкувати поверхні із кутом нависання  $90^\circ$  із найбільшими розмірами та складністю геометрії. Але для його реалізації необхідно використовувати принципово інший тип принтеру, слайсеру та g-коду, що використовує горизонтальну поворотну ось.

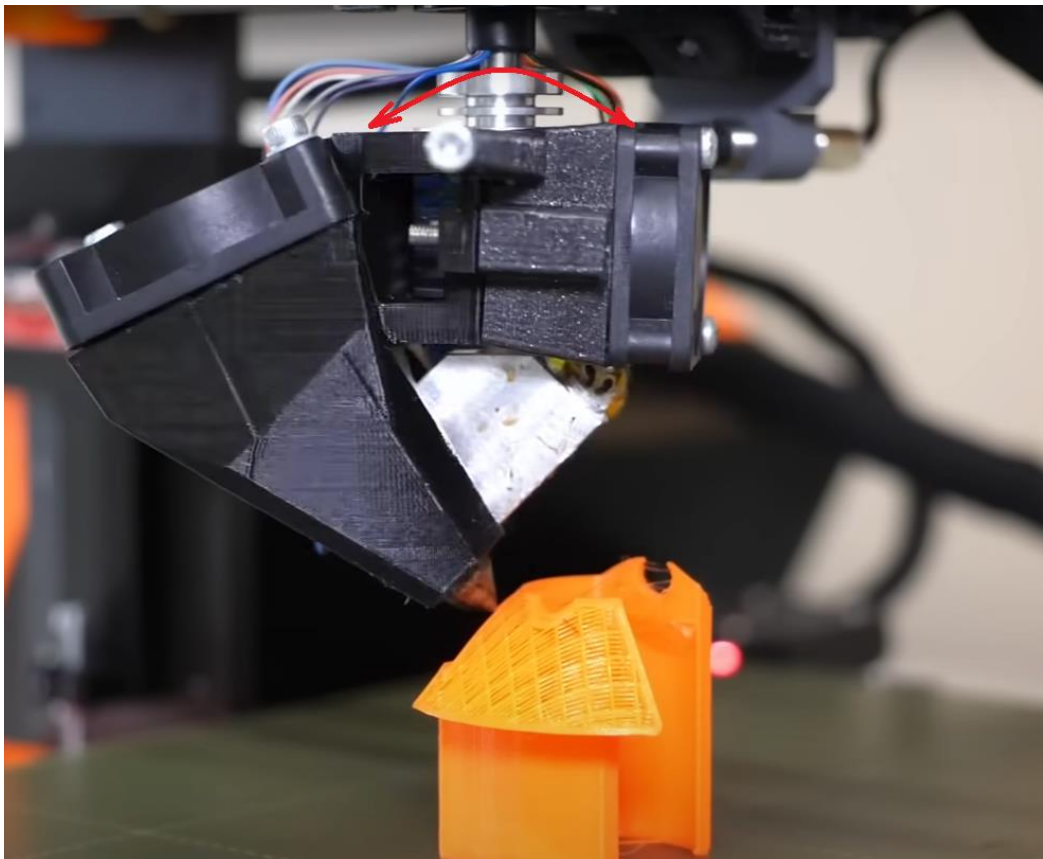


Рисунок 1.14 – Друк на 3,5 осьовому 3D принтері

## 1.5 Висновки до першого розділу

Підтримки FFF/FDM 3D друку це технологічні елементи, що необхідні для друку поверхонь із великим кутом нависання відносно робочої платформи. У разі відсутності підтримок, похилі поверхні під дією сили тяжіння будуть деформуватись.

Для позбавлення підтримок в процесі друку є конструкційні та технологічні. Конструкційні методи передбачають зміну конструкції моделі: створення фасок, закруглень, орієнтація моделей та поділ їх на окремі частини. Дані методи застосовуються з певними обмеженнями і їх не завжди можна використовувати. Технологічні методи передбачають зміну технології друку: друк під кутом, друк конічними поверхнями і т.д. Це передбачає зміну алгоритму САМ системи, зміну конструкції екструдера або зміну конструкції всього принтеру. Дані методи є більш складними у реалізації, але дозволяють виробництво деталей складної форми без зміни їх форми.

Саме розробці 3D принтеру адаптованого для друку без підтримок будуть присвячені наступні розділи кваліфікаційної роботи.

## 2 РОЗРОБКА ПОЛЯРНОГО 3D ПРИНТЕРУ

### 2.1 Аналіз вибору циліндричної системи координат

Полярний FDM 3D-принтер відрізняється від традиційних декартових 3D-принтерів своєю системою координат. У той час як картезіанські принтери працюють у просторі трьох перпендикулярних осей  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ , полярні 3D-принтери використовують циліндричну систему координат, де переміщення описується вертикальною віссю, радіусом і кутом повороту (рисунок 2.1) [9].

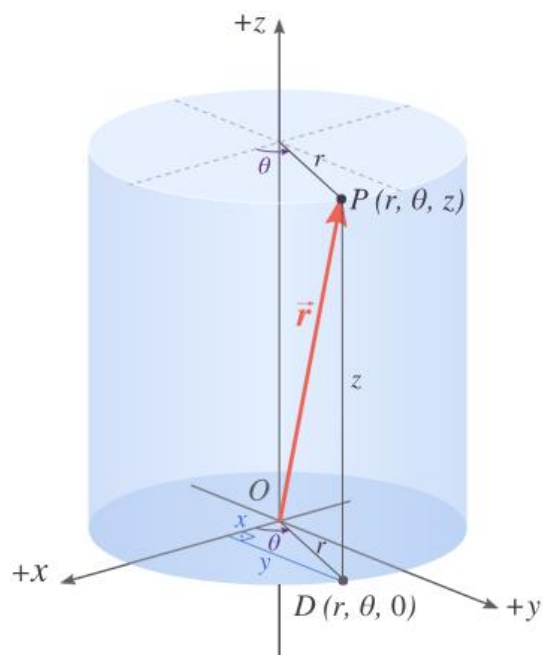


Рисунок 2.1 – Циліндрична система координат полярних 3D принтерів

Циліндрична система координат має кілька суттєвих переваг над декартовою системою координат у верстатах з ЧПУ (числовим програмним управлінням), особливо коли йдеться про обробку складних деталей або специфічних завдань. Циліндрична система координат використовує три основні параметри: радіальну координату ( $r$ ), кутову координату ( $\theta$ ) та вертикальну

координату ( $z$ ). У свою чергу, декартова система координат використовує осі  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ . Циліндрична системи координат і полярні 3D принтери в порівнянні з декартовою певну кількість переваг в контексті ЧПУ–обробки:

– ефективна обробка деталей обертальної форми. Циліндрична система координат особливо корисна для обробки деталей, що мають обертальну або симетричну форму. В таких випадках використання циліндричних координат дозволяє краще управляти рухами інструменту, що призводить до більш точного і швидкого виконання операцій. Вона природно підходить для обробки циліндричних, круглих і трубоподібних деталей, що часто зустрічаються в промисловості, наприклад, у машинобудуванні або авіакосмічній галузі;

– зменшення кількості переміщень. У циліндричній системі можна ефективніше виконувати рухи обробки, що зменшує кількість необхідних переміщень. Наприклад, при роботі над об'єктом обертальної симетрії (циліндри, конуси, сфери) можна використовувати обертання навколо осі, замість лінійних переміщень по осі  $X$  або  $Y$ , як у декартовій системі. Це призводить до скорочення траєкторій, зменшення часу обробки і зниження зносу інструменту;

– спрощення роботи з круглими і симетричними об'єктами. При роботі з об'єктами, що мають осьову симетрію, циліндрична система координат дозволяє уникнути складних перетворень і розрахунків, які можуть виникнути в декартовій системі. Це значно спрощує програмування траєкторій руху інструменту, що полегшує процес обробки і зменшує ймовірність помилок. Наприклад, на токарних верстатах циліндрична система координат дозволяє легше керувати процесом точіння, при якому важливо точно контролювати обертання заготовки;

– точність обробки складних поверхонь. Циліндрична система особливо корисна при обробці складних поверхонь або деталей з різними радіусами і кутами нахилу. Використання радіальних і кутових координат дозволяє з більшою точністю керувати рухами інструменту при обробці таких поверхонь, ніж це можливо в декартовій системі, де зміщення вздовж осей  $X$  і  $Y$  може призвести до ускладнень;

– зниження механічних навантажень. У деяких випадках циліндрична система дозволяє знизити механічні навантаження на рухомі частини верстата. У декартовій системі, особливо при обробці об'єктів з обертальними елементами, необхідно здійснювати часті і великі переміщення інструменту по осі X і Y. В циліндричній системі багато рухів здійснюється шляхом обертання, що зменшує навантаження на лінійні приводи та знижує ймовірність зносу обладнання;

– зменшення кількості операцій. У декартовій системі для обробки циліндричних або конічних об'єктів часто потрібно додаткові операції, такі як ручне налаштування положення деталі або зміна інструменту. У циліндричній системі обробка таких деталей може бути виконана за меншу кількість етапів, що підвищує ефективність виробництва та знижує вартість обробки;

– інтуїтивне програмування для обертальних деталей. Для оператора або програміста, що працює з деталями обертальної форми, циліндрична система координат часто є більш інтуїтивною. Вона дозволяє простіше налаштувати і програмувати рухи інструменту для таких задач, як обробка валів, дисків, труб або шестерень. Це також зменшує ймовірність помилок при написанні програм і сприяє підвищенню продуктивності;

– підвищена точність в роботі з великими діаметрами. У декартовій системі, при роботі з деталями великих діаметрів, може виникнути проблема з точністю через велику довжину лінійних переміщень по осі X і Y. У циліндричній системі рух здійснюється обертанням навколо центральної осі, що дозволяє зберігати високу точність обробки навіть для деталей значного діаметра;

– скорочення часу програмування. Програмування траєкторій у циліндричній системі координат може бути простішим і швидшим для деталей обертальної симетрії. Це знижує час, необхідний для підготовки до обробки, і прискорює процес виробництва. Менше часу на програмування дозволяє оператору швидше налаштувати верстат і зосереджуватися на інших аспектах виробництва;

– можливість гібридних систем. Багато сучасних верстатів використовують гібридні системи координат, поєднуючи декартову і циліндричну системи для отримання переваг обох підходів. Це дозволяє одночасно обробляти як плоскі, так і обертальні поверхні, використовуючи найкращі особливості кожної системи;

– що важливо для проекту, що виконується в рамках кваліфікаційної роботи магістра, циліндрична система координат дозволяє легше організувати додаткову обертову ось  $\alpha$  для забезпечення обертання навколо вертикальної осі. Це дозволить друкувати без підтримок під кутом  $45^\circ$ .

Циліндрична система координат має низку переваг перед декартовою системою в контексті верстатів з ЧПУ, особливо коли мова йде про обробку обертальних, симетричних і складних деталей. Вона забезпечує ефективніше управління рухами, знижує навантаження на механічні компоненти, спрощує програмування і підвищує точність обробки. Вибір системи координат залежить від конкретних завдань виробництва, але в багатьох випадках циліндрична система має більше переваг для ряду технологічних процесів.

## 2.2 Розробка конструкції 3D принтеру

Для проектування конструкції принтеру обрано CAD систему Fusion Autodesk [10]. Зовнішній вигляд принтеру, що розроблено наведено на рисунках 2.2 та 2.3.

Умовно конструкцію можна поділити на окремі вузли:

- корпус;
- ось Z;
- ось  $\theta$ ;
- ось R;
- ось  $\alpha$ .

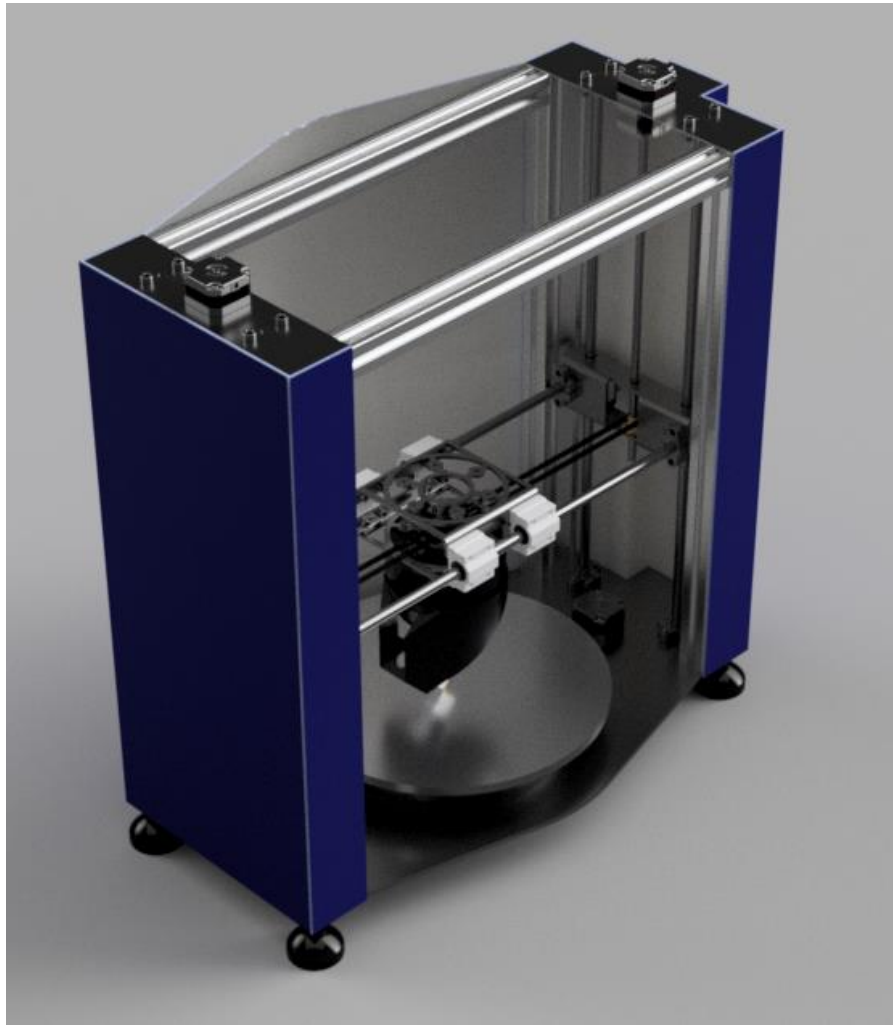


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд 3D принтеру, що розроблено

Ось  $R$  відповідає за горизонтальне переміщення вздовж радіальної координати. Ось  $\theta$  – за обертання робочої платформи навколо вертикальної осі. Ось  $Z$  – за вертикальне лінійне переміщення. Дані три осі  $R$ ,  $\theta$ ,  $Z$  відповідають за просторове переміщення екструдера. Ось  $\alpha$  забезпечує обертання екструдера навколо вертикальної осі для друку без підтримок.

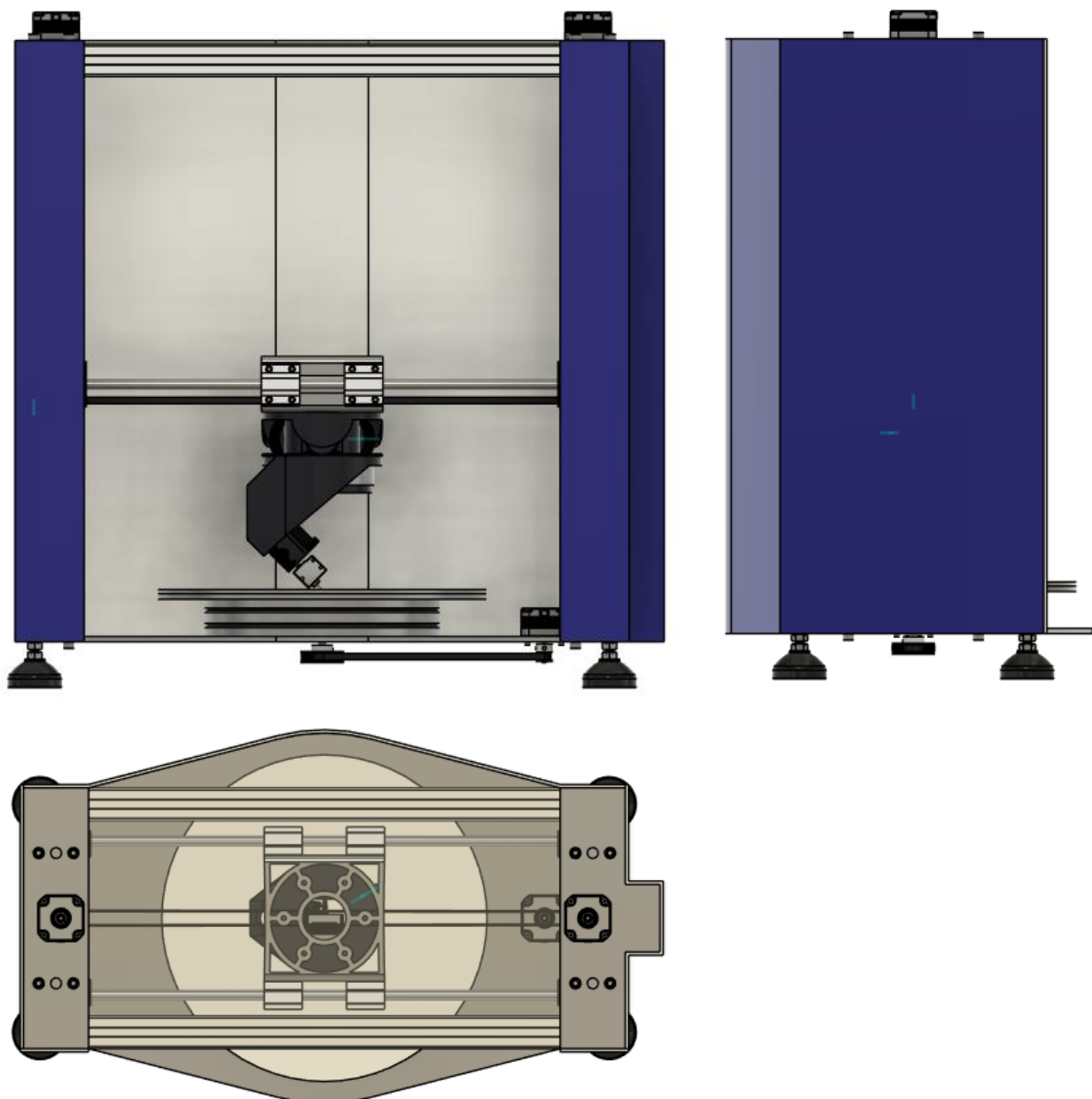


Рисунок 2.3 – Ескіз 3D принтеру, що розроблено

Для покращення візуалізації у наступних підрозділах кожен вузол буде розглянуто окремо.

### 2.3 Корпус

Під корпусом принтеру слід розуміти раму принтеру та його облицювання. Рама принтеру вирішено виготовляти з алюмінієвого верстатного профілю

(аналог профілю Bosch українського виробництва) та листової сталі марки СтЗ.  
Зовнішній вигляд корпусу наведено на рисунках 2.4 та 2.5.

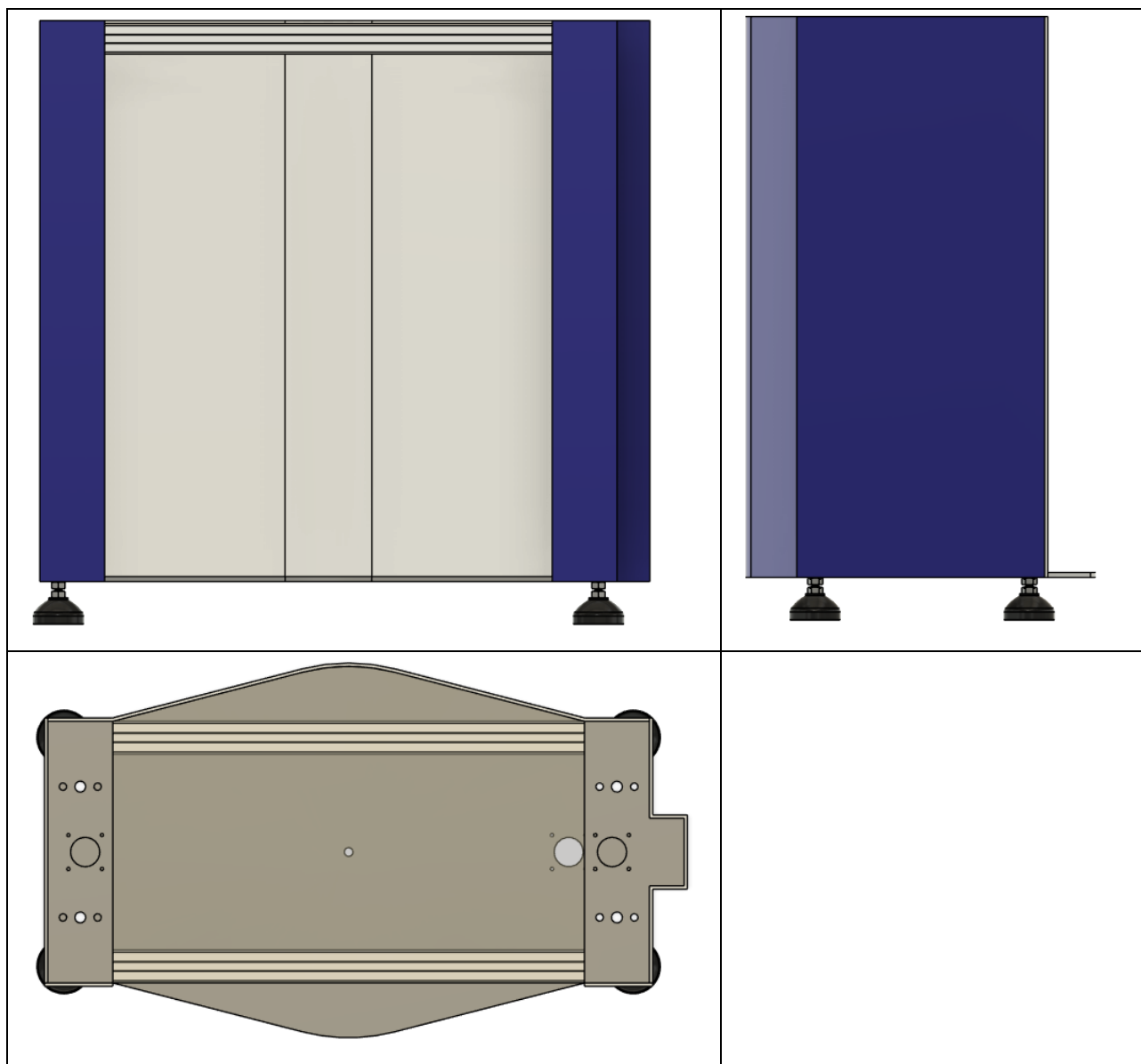


Рисунок 2.4 – Ескіз корпусу 3D принтеру

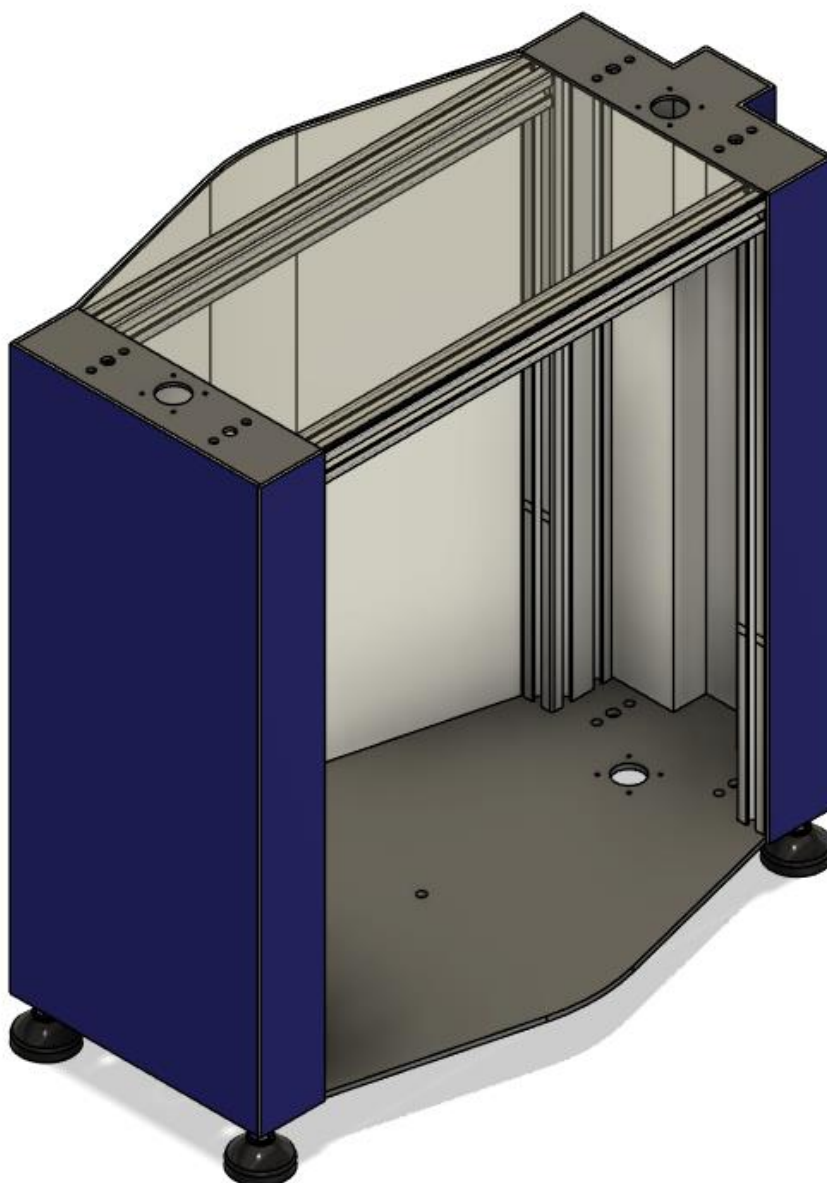


Рисунок 2.5 – Корпусу 3D принтеру

Вибір алюмінієвого верстатного профілю зумовлено високою жорсткістю на вигин та скручування, великою кількістю сумісних кріплень та фурнітури, що дозволить уникнути операцій зварювання та клепки. Сталеві листи Ст3 мають низьку вартість та забезпечують площинність елементів кріплення платформи, крокових двигунів та інше.

Для облицювання використовуються композитний ABS пластик товщиною 3 мм для бічних стінок та прозоре оргскло товщиною 3 мм для кришки. Облицювання дозволить зменшити вплив зовнішнього середовища та запобігти потраплянню сторонніх предметів в зону друку, що може призвести до

браку виробництва. Фіксація облицювання на рамі відбувається за допомогою саморізів по металу та фіксації на отворах в алюмінієвому профілі.

Корпус 3D принтера складається з наступних стандартних деталей:

- верстатний алюмінієвий профіль 30 мм x 30 мм x 435 мм – 2 шт;
- верстатний алюмінієвий профіль 30 мм x 60 мм x 543 мм – 4 шт;
- кутовий з’єднувач 3030 – 4 шт;
- гумові амортизуючі ніжки паз 8 мм – 4 шт.

Гвинти, саморізи, т-гайки.

Зображення стандартних деталей можна побачити на рисунку 2.6.

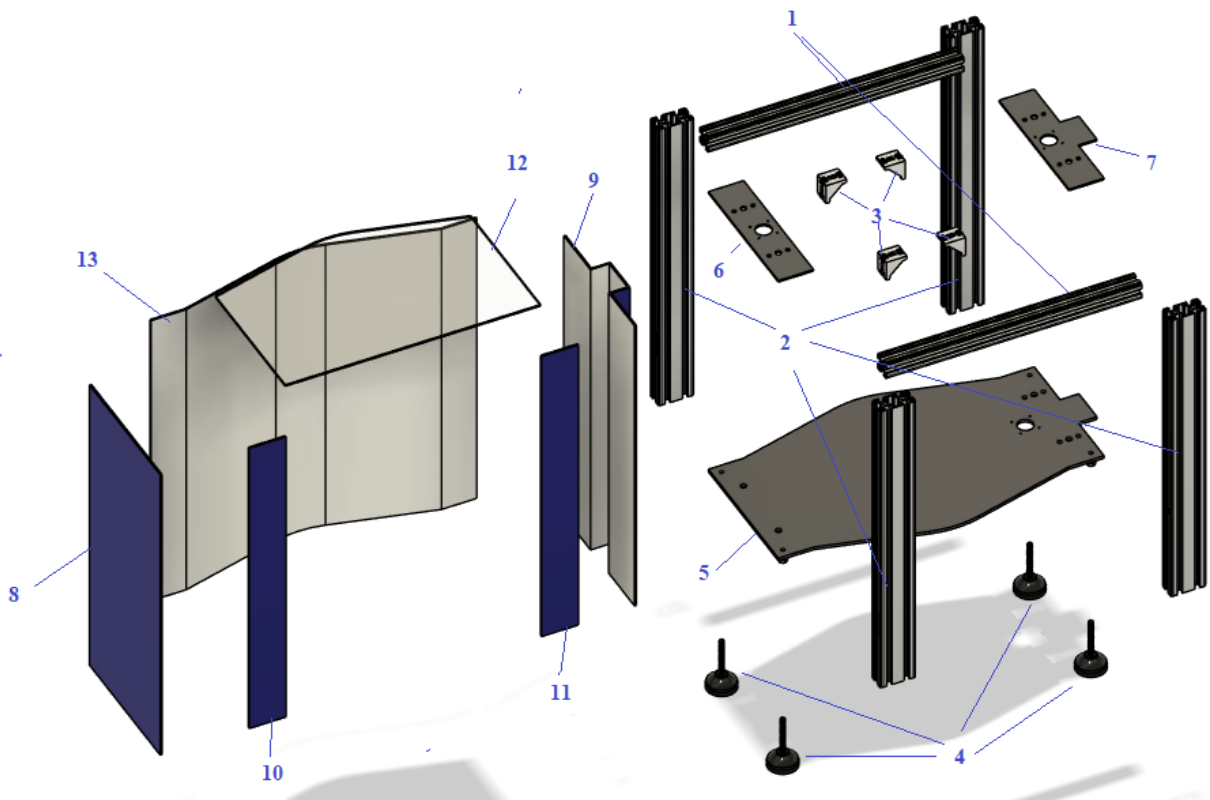


Рисунок 2.6 – Вибух-схема корпусу

До нестандартних деталей корпусу відносяться:

- сталева пластина дна сталь Ст3 товщина 5 мм – 1 шт;
- ліва верхня сталевая пластина Ст3 товщина 3 мм – 1 шт;
- права верхня сталевая пластина Ст3 товщина 3 мм – 1 шт;
- ліва бічна пластина корпусу композитний листовий ABS 3 мм – 1 шт;

- права бічна пластина корпусу композитний листовий ABS 3 мм – 1 шт;
- ліва передня пластина корпусу композитний листовий ABS 3 мм – 1 шт;
- права передня пластина корпусу композитний листовий ABS 3 мм – 1 шт;
- верхня пластина корпусу оргскло листове 3 мм – 1 шт;
- задня пластина корпусу композитний листовий ABS 3 мм – 1 шт.

Сталева пластина дна виготовлюється із сталі Ст3 товщиною 5 мм (рисунок 2.7). Дана деталь є однією з основних і вимагає високої жорсткості та міцності. На даній пластині фіксується нижні торці верстатного профілю 30 мм х 60 мм, кроковий двигун осі  $\theta$ , вали вертикальної осі  $Z$  та їх кронштейни, а також вал осі  $\theta$ .

Пластина виготовляється за технологією лазерної, плазмової або гідроабразивного різання.

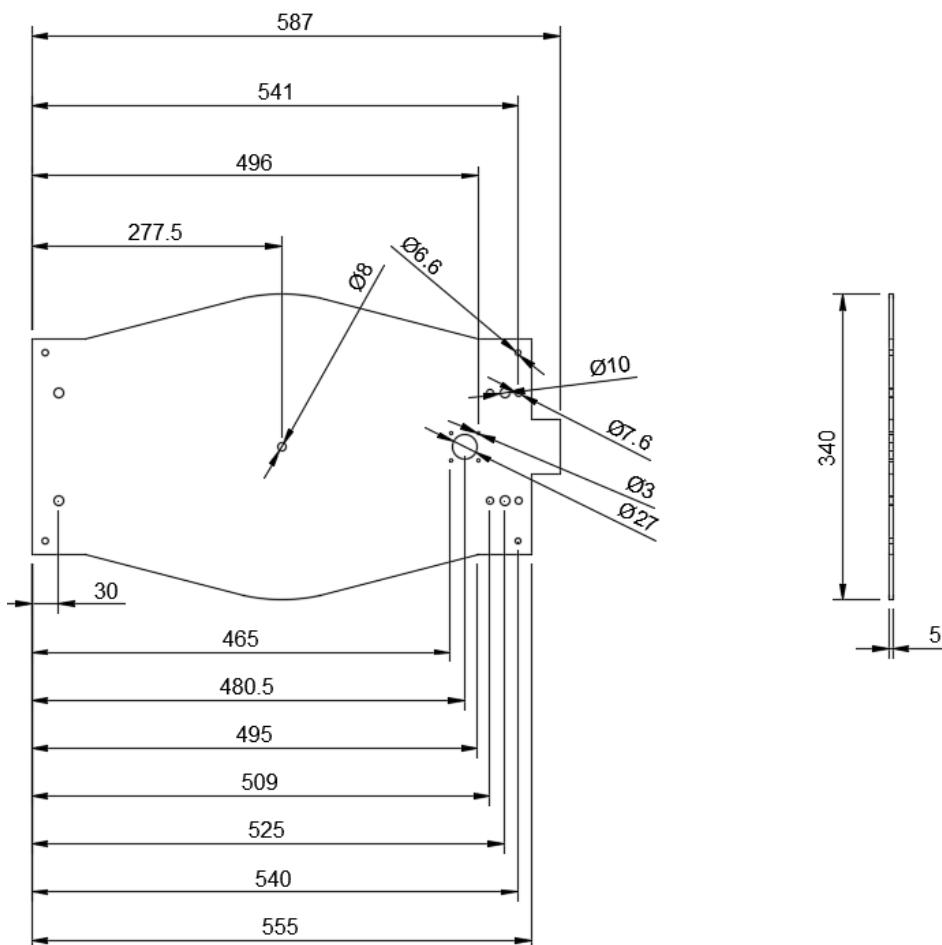


Рисунок 2.7 – Ескіз сталевої пластини дна

Ліва сталевіа пластина дна виготовлюється із сталі Ст3 товщиною 3 мм (рисунок 2.8). Дана деталь є однією з основних і вимагає високої жорсткості та міцності. На даній пластині фіксується верхні торці верстатного профілю 30 мм х 60 мм, лівий кроковий двигун осі Z, вали вертикальної осі Z та їх кронштейни.

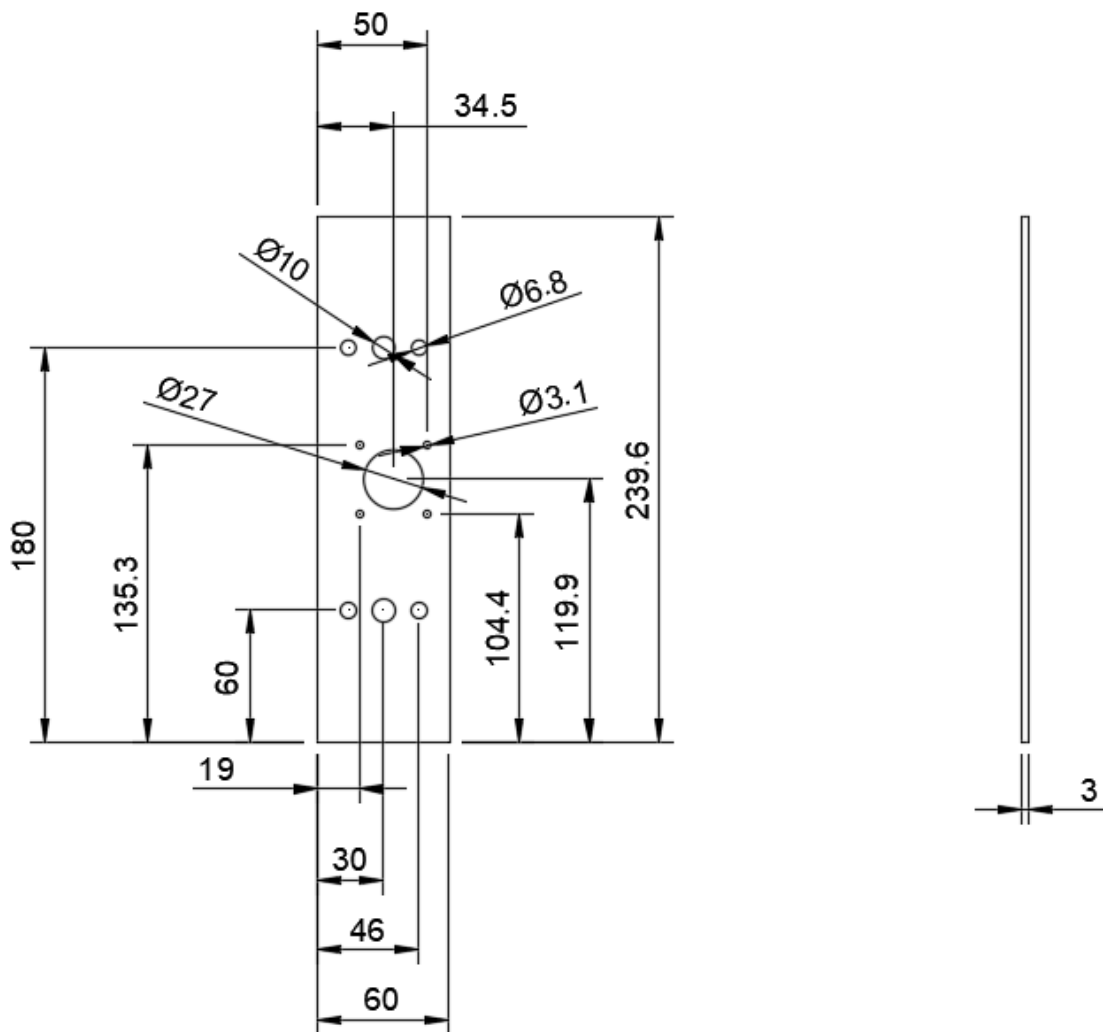


Рисунок 2.8 – Ескіз лівої верхньої сталевіа пластини

Пластина виготовляється за технологією лазерної, плазмовіа або гідраабразивного різання.

Права сталевіа пластина дна виготовлюється із сталі Ст3 товщиною 3 мм (рисунок 2.9). Дана деталь є однією з основних і вимагає високої жорсткості та міцності. На даній пластині фіксується верхні торці верстатного профілю 30 мм х 60 мм, лівий кроковий двигун осі Z, вали вертикальної осі Z та їх кронштейни.

Права пластина відрізняється від лівої наявністю виступу для захисту крокового двигуна осі R.

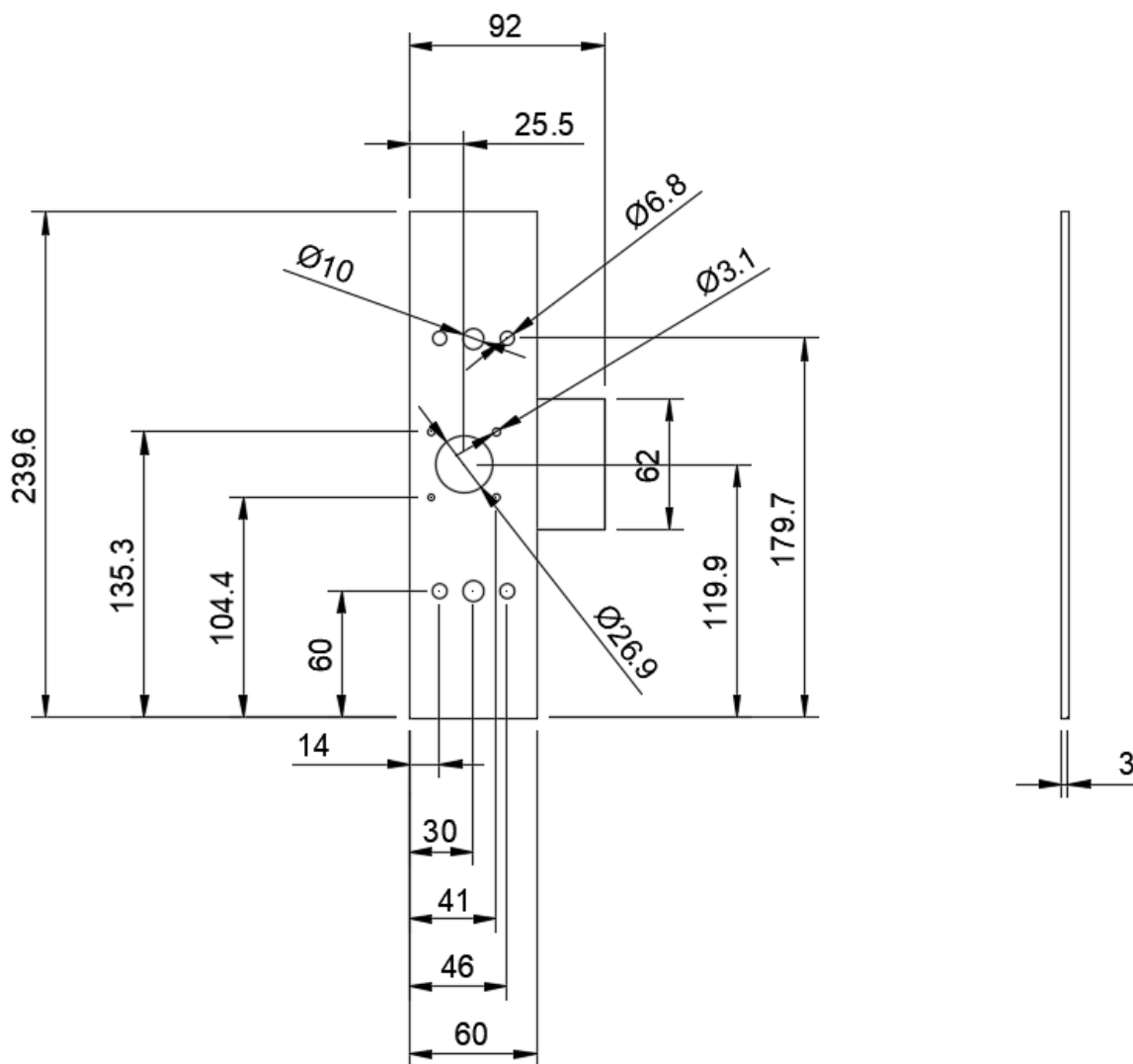


Рисунок 2.9 – Ескіз правої верхньої сталеві пластини

Пластина виготовляється за технологією лазерної, плазмової або гідроабразивного різання.

Ліва бічна пластина корпусу виготовляється із композитного листового ABS пластику із алюмінієвим покриттям товщиною 3 мм (рисунок 2.10). Пластина виконує ізоляційну і декоративну функцію, захищаючи робочий простір від зовнішнього середовища. На пластині відсутні отвори для монтажу, монтаж виконується безпосередньо на рамі.

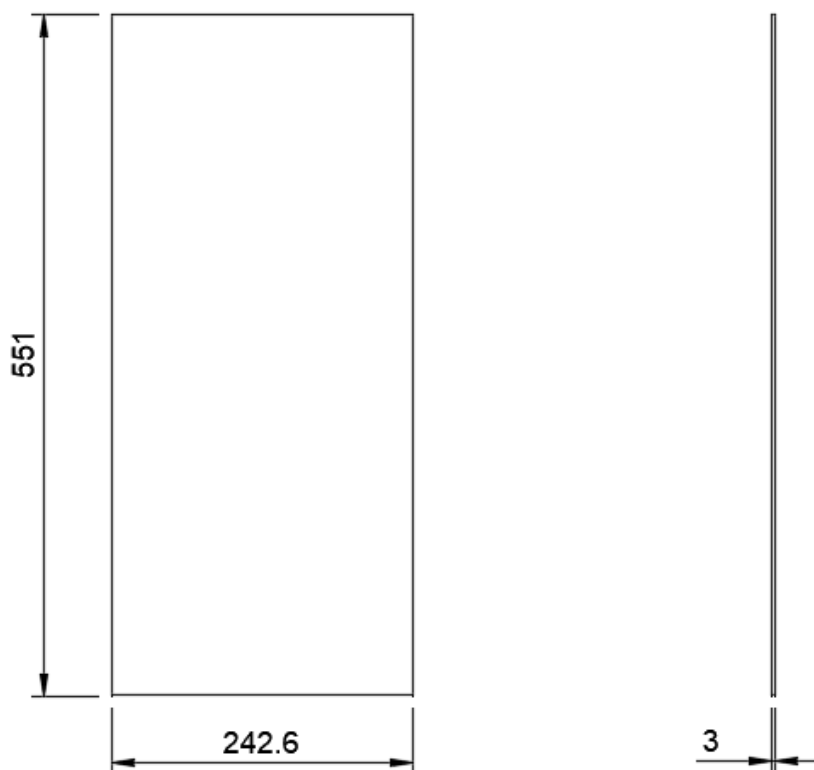


Рисунок 2.10 – Ескіз лівої бічної пластини корпусу

Пластина виготовляється за технологією лазерного різання або фрезерування.

Права бічна пластина корпусу виготовляється із композитного листового ABS пластику із алюмінієвим покриттям товщиною 3 мм (рисунок 2.11). Пластина виконує ізоляційну і декоративну функцію, захищаючи робочий простір від зовнішнього середовища. На пластині відсутні отвори для монтажу, монтаж виконується безпосередньо на рамі. Пластина має вигини під кутом  $90^\circ$ , для їх утворення на поверхні пластини виконуються V-подібні виборки.

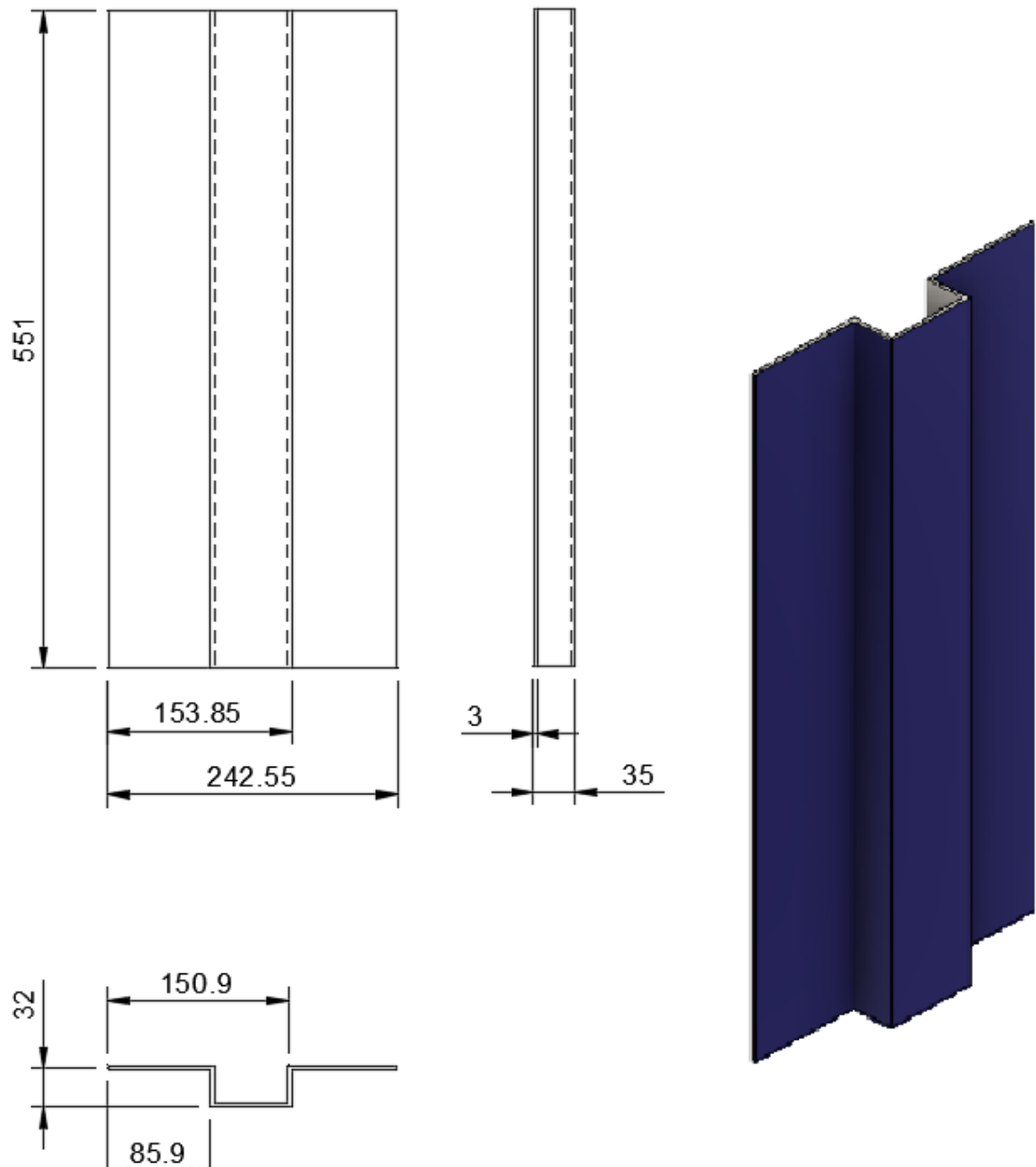


Рисунок 2.11 – Ескіз правої бічної пластини корпусу

Пластина виготовляється за технологією лазерного різання або фрезерування. Вигин виконується вручну.

Ліва і права передні пластини корпусу виготовляється із композитного листового ABS пластику із алюмінієвим покриттям товщиною 3 мм (рисунок 2.12). Пластини виконують ізоляційну і декоративну функцію, захищаючи робочий простір від зовнішнього середовища. На пластинках відсутні отвори для монтажу, монтаж виконується безпосередньо на рамі.

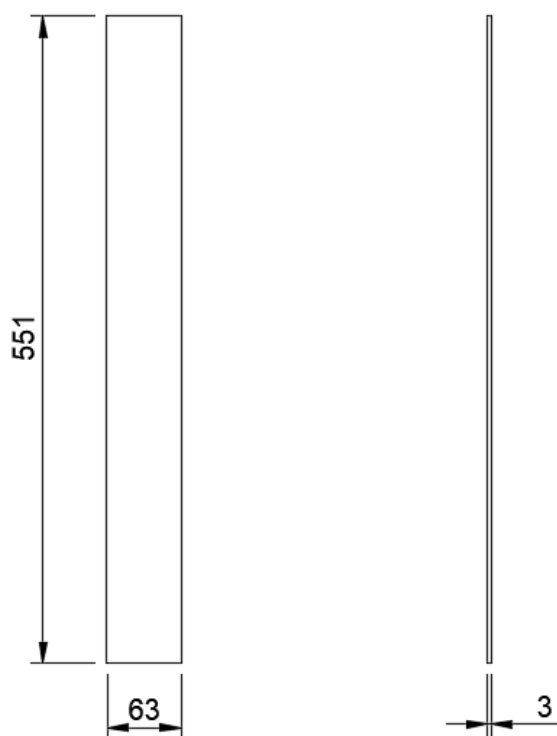


Рисунок 2.12 – Ескіз лівої і правої передніх пластин корпусу

Пластина виготовляється за технологією лазерного різання або фрезерування.

Верхня пластина корпусу виготовляється із оргскла товщиною 3мм (рисунок 2.13). Пластини виконують ізоляційну і декоративну функцію, захищаючи робочий простір від зовнішнього середовища. На пластинах відсутні отвори для монтажу, монтаж виконується безпосередньо на рамі. Пластина виготовляється із прозорого оргскла для можливості моніторингу процесу друку.

Пластина виготовляється за технологією лазерного різання або фрезерування.

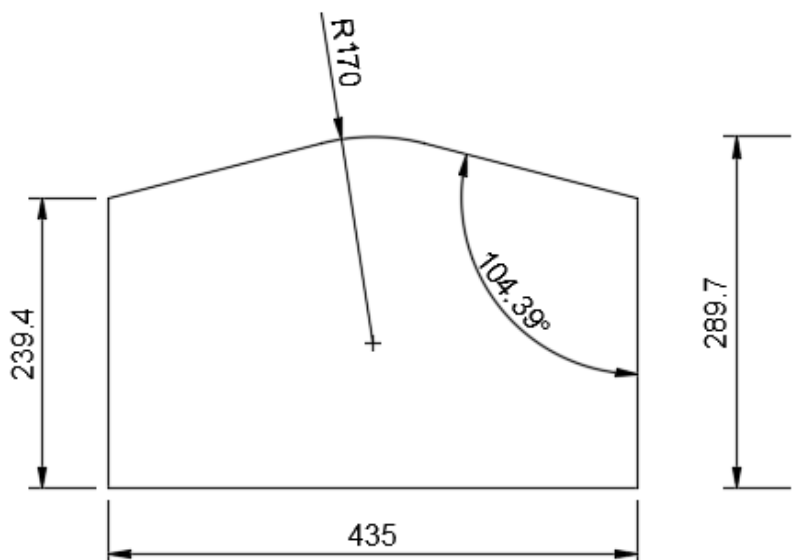


Рисунок 2.13 – Ескіз верхньої пластини корпусу

Задня пластина корпусу виготовляється із композитного листового ABS пластику із алюмінієвим покриттям товщиною 3 мм (рисунок 2.14). Пластина виконує ізоляційну і декоративну функцію, захищаючи робочий простір від зовнішнього середовища. На пластині відсутні отвори для монтажу, монтаж виконується безпосередньо на рамі. Пластина має незначний вигин, який не потребує виборок.

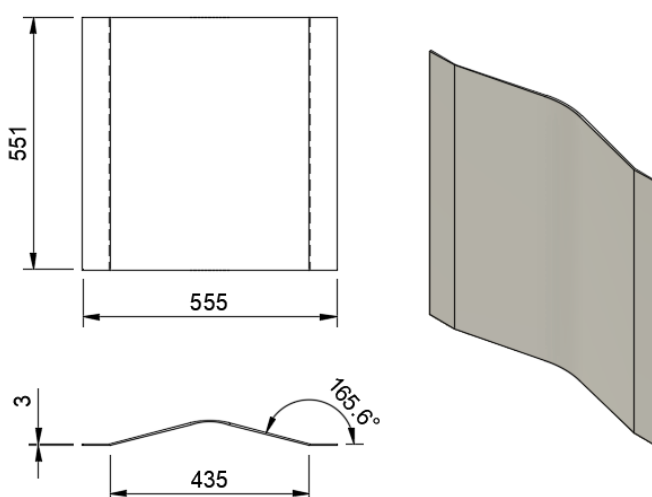


Рисунок 2.14 – Ескіз задньої пластини корпусу

## 2.4 Осць Z

Ось Z використовується для переміщення в вертикальному напрямку (рисунок 2.15 та 2.16). Осць Z утримує ось R і рухає її вгору та вниз. Для переміщення використовується гвинтова передача, що забезпечує достатню точність та стабільність роботи.



Рисунок 2.15 – Осць Z



Рисунок 2.16 – Ескіз осі Z

Для забезпечення вертикальності переміщення використовується система з чотирьох валів діаметром 10 мм та чотирьох корпусних підшипників. У якості приводу використовується два крокових двигуна Nema 17.

Ось Z (рисунок 2.17) містить наступні стандартні компоненти:

- крокові двигуни Nema 17 – 2 шт;
- муфта перехідна – 2 шт;
- шпилька та гвинт трапецеподібні діаметром 8 мм, довжина 400 мм – 2 шт;
- вали діаметром 10 мм, довжиною 543 мм – 4 шт;

- корпусний лінійний підшипник SCS10UU – 4 шт;
- тримач валу SHF10 – 8 шт;
- гвинти, гайки.

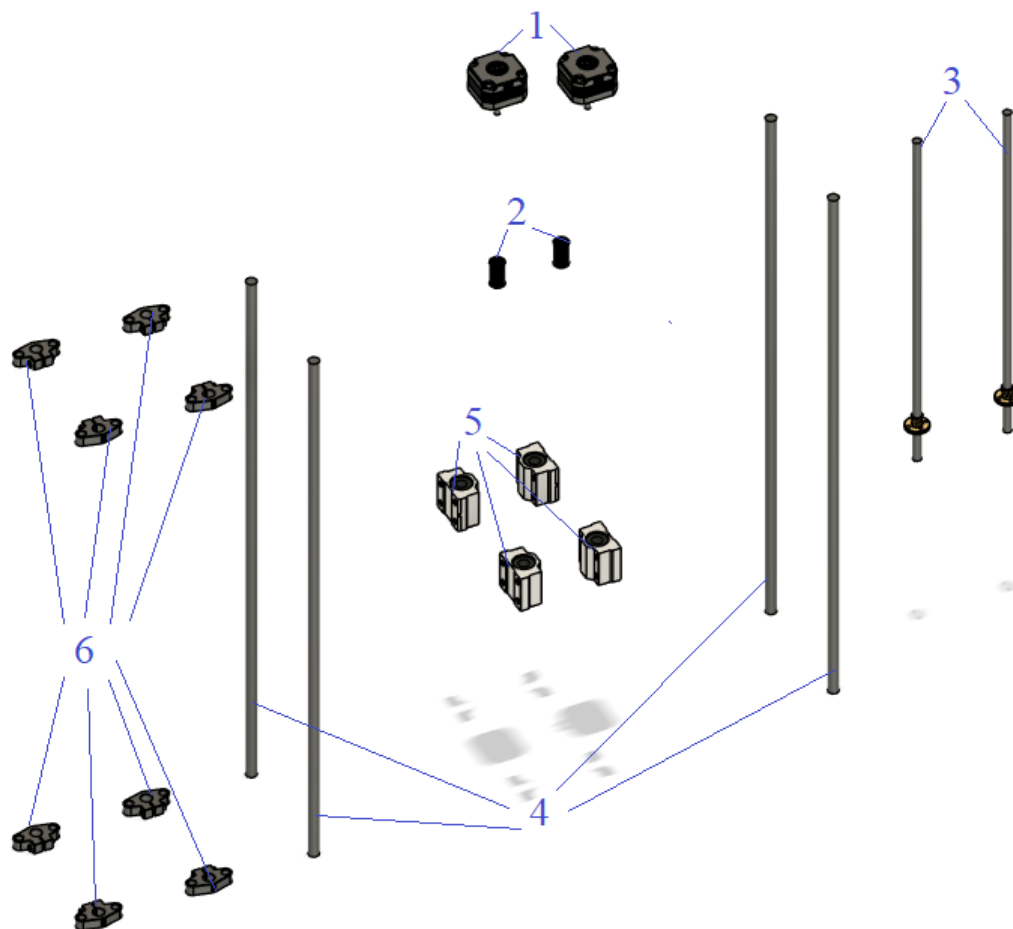


Рисунок 2.17 – Вибух-схема осі Z

Нестандартні компоненти в даній збірці немає.

## 2.5 Ось R

Ось R забезпечує переміщення екструдера вздовж радіальної координати циліндричної системи координат (рисунок 2.18 та 2.19). Для переміщення вздовж осі R використовується ремінна передача з використанням крокового двигуна Nema 17, ременю GT2 шириною 6 мм та системи шківів. Лінійність переміщення

забезпечується валами діаметром 10 мм та системою корпусних лінійних підшипників.

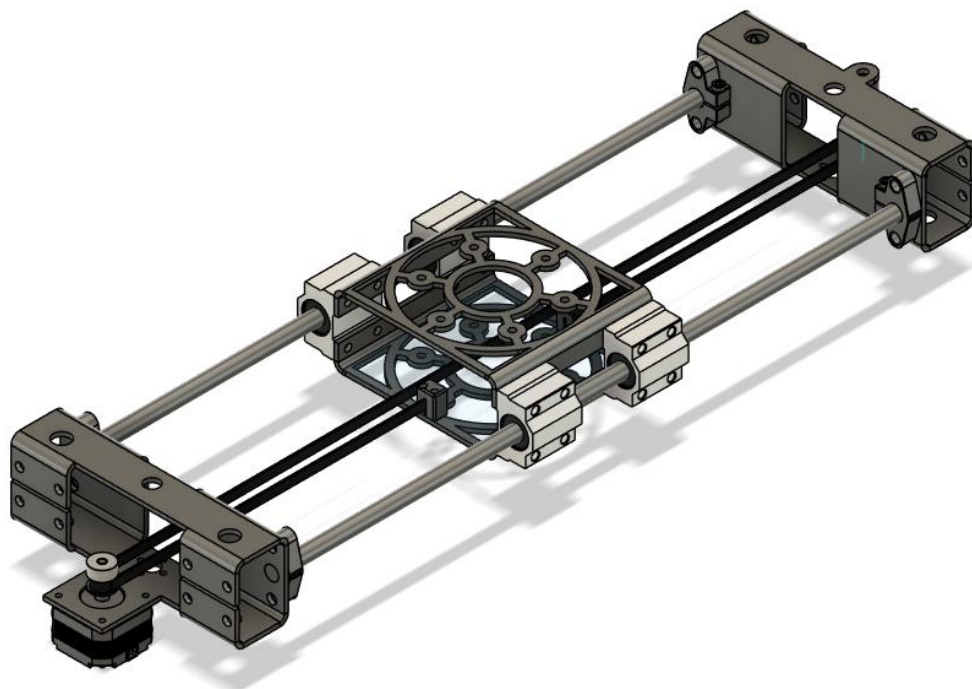


Рисунок 2.18 – Ось R

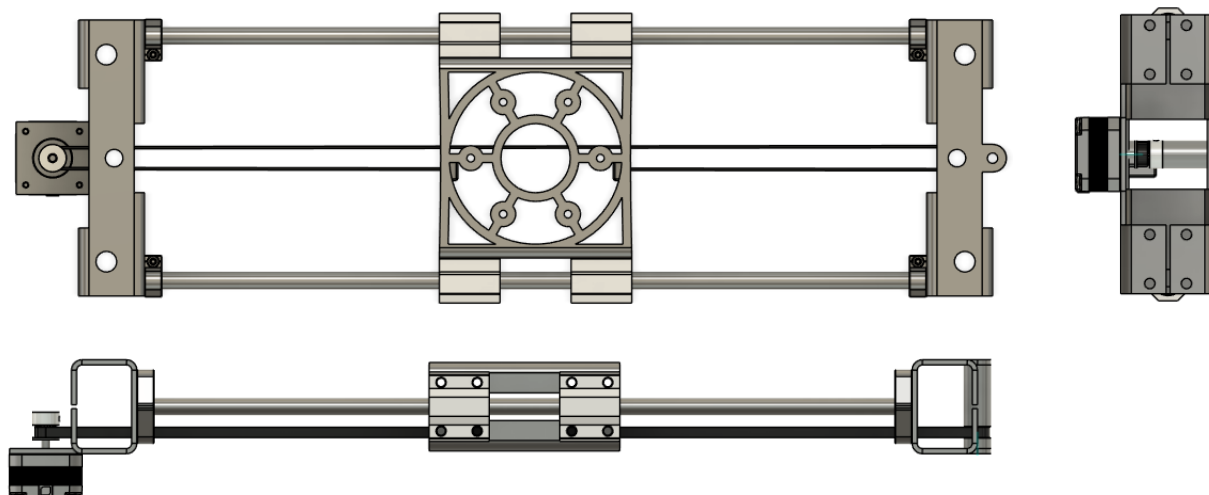


Рисунок 2.19 – Ескіз осі R

Ось R (рисунок 2.20) містить наступні стандартні компоненти:

- крокові двигуни Nema 17 – 1 шт;
- вал діаметром 10 мм, довжиною 451 мм – 2 шт;

- корпусних лінійний підшипник SCS10UU – 4 шт;
- шків зубчатий приводний 20 зубців, шириною 6 мм – 1 шт;
- підшипник MR126ZZ C3 NSK – 2 шт;
- тримач валу SHF10 – 4 шт;
- ремінь зубчатий GT2, шириною 6 мм, довжиною 1200 мм.

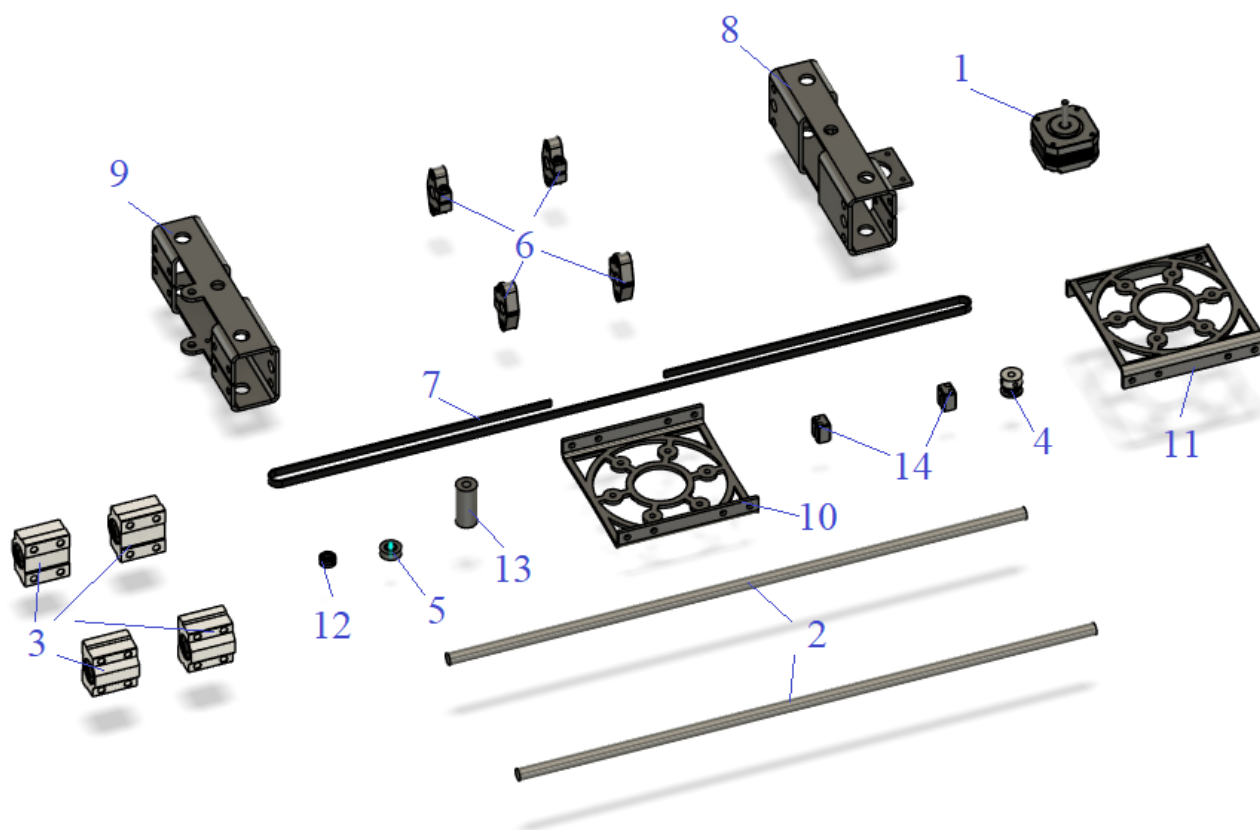


Рисунок 2.20 – Вибух схема осі R

До нестандартних деталей корпусу відносяться:

- ліва каретка осі R;
- права каретка осі R, листовая сталь товщиною 3 мм Ст3 – 1 шт;
- нижня частина корпусу каретки екструдера, листовая сталь товщиною 3 мм Ст3 – 1 шт;
- верхня частина корпусу каретки екструдера, листовая сталь товщиною 3 мм Ст3 – 1 шт;
- нижня опора опозитного підшипника, PET пластик – 1 шт;

- верхня опора опозитного підшипника, PET пластик – 1 шт;
- лівий та правий фіксатори ременю, PET пластик – 2 шт.

Ліва каретка осі R із сталі Ст3 товщиною 3 мм (рисунок 2.21 та 2.22). Завдяки каретці ось R фіксується на осі Z, до неї кріпляться гайка гвинтової передачі та лінійні корпусні підшипники SCS10UU. Також на каретці фіксуються вали осі R та кроковий двигун Nema 17, які забезпечують переміщення вздовж осі Z.

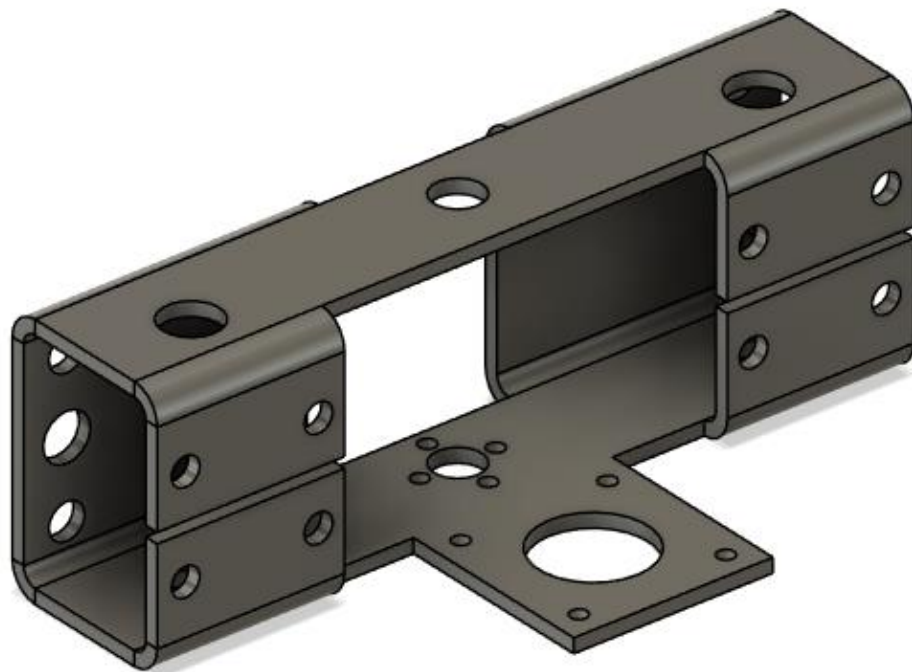


Рисунок 2.21 – Ліва каретка осі R

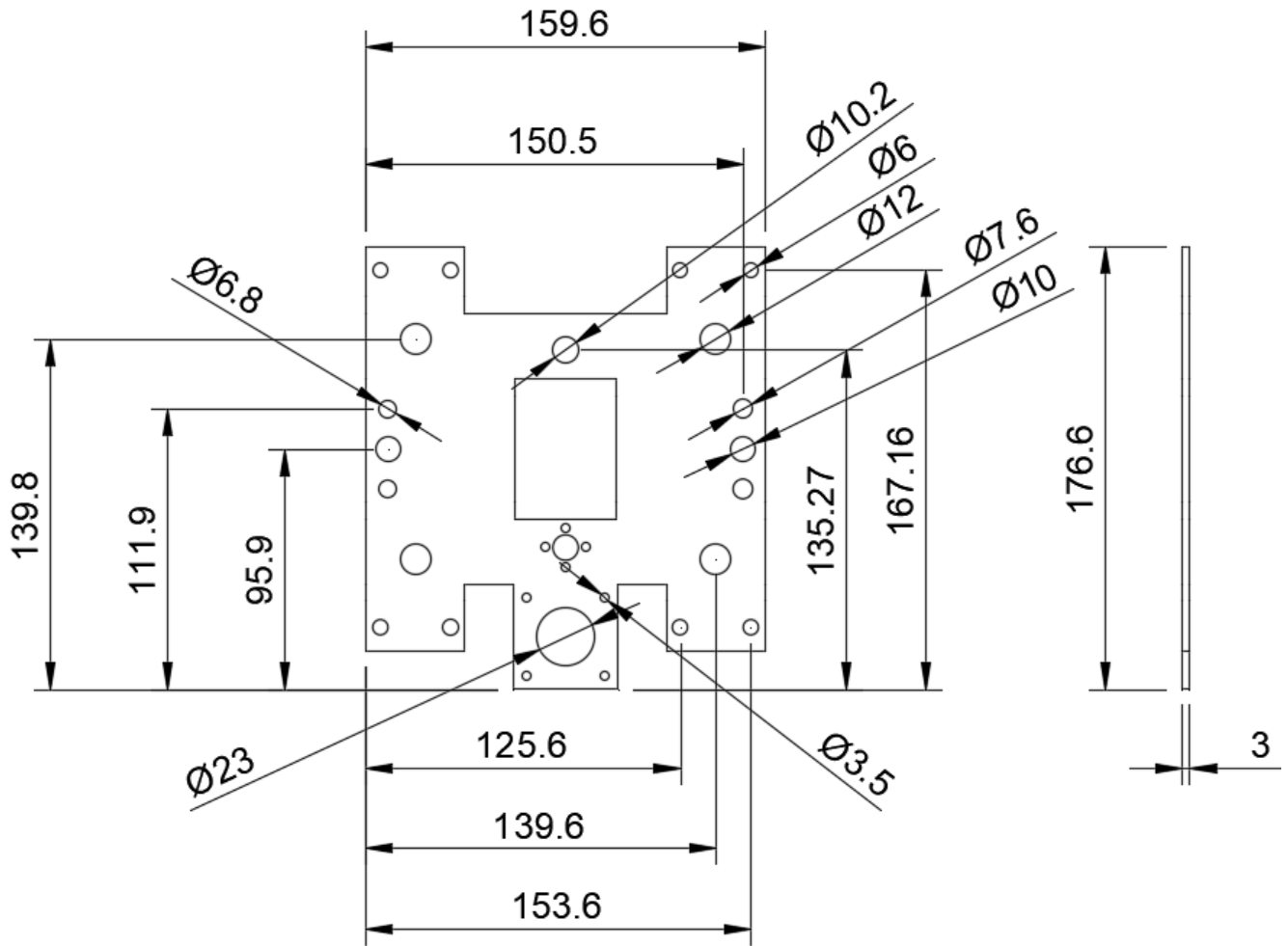


Рисунок 2.22 – Ескіз розгортки лівої каретки осі R

Каретка виготовляється за допомогою лазерної різки та листової гібки за стандартними правилами, внутрішній радіус дорівнює товщини листа, тобто 3 мм.

Права каретка осі R виготовляється із сталі Ст3 товщиною 3 мм (рисунок 2.23 та 2.24). Завдяки каретці ось R фіксується на осі Z, до неї кріпляться гайка гвинтової передачі та лінійні корпусні підшипники SCS10UU. Також на каретці фіксуються вали осі R та опозитні підшипники ремінної передачі, які забезпечують переміщення вздовж осі Z.

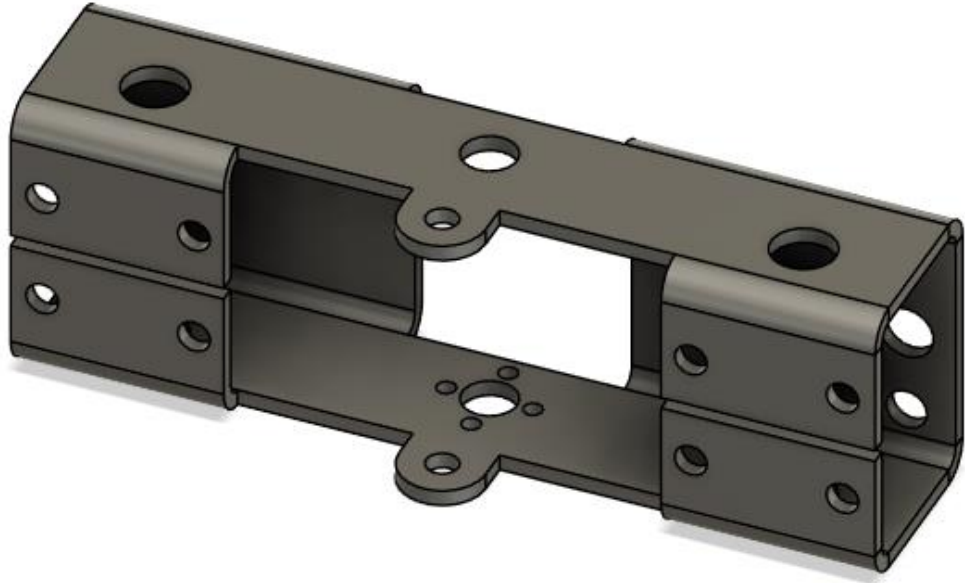


Рисунок 2.23 – Права каретка осі R

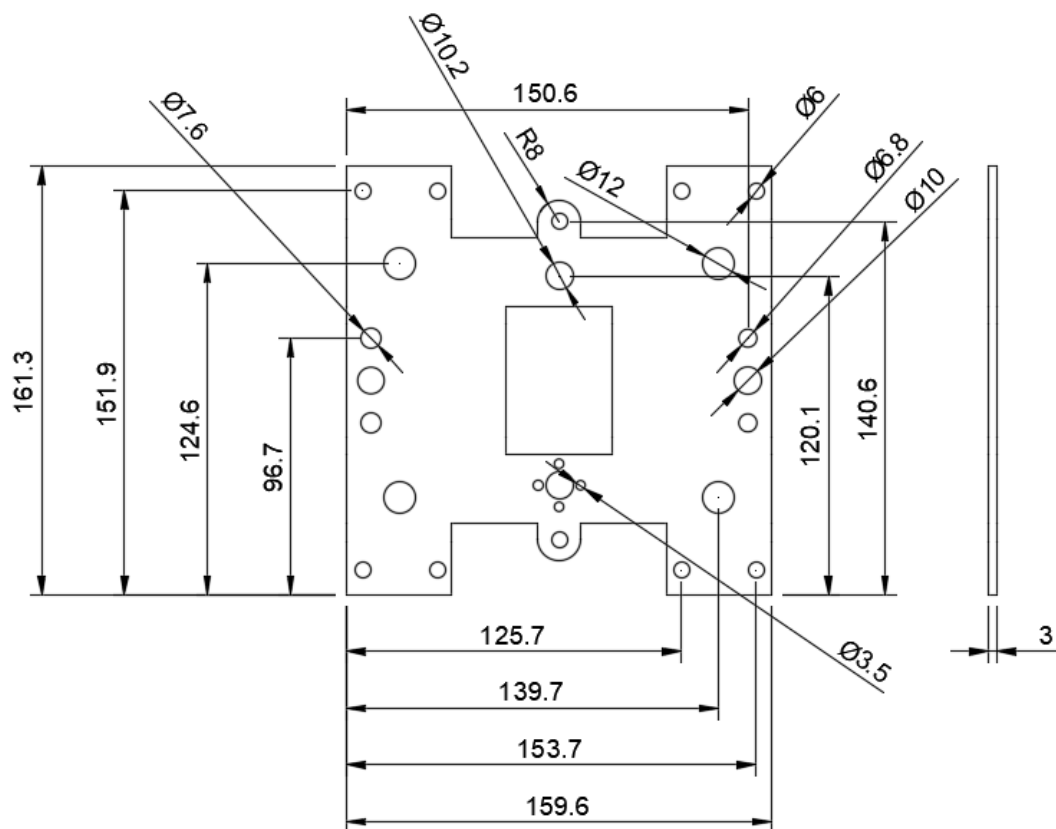


Рисунок 2.24 – Ескіз розгортки правої каретки осі R

Каретка виготовляється за допомогою лазерної різки та листової гнбки за стандартними правилами, внутрішній радіус дорівнює товщини листа, тобто 3 мм.

Нижня та верхня частини корпусу каретки екструдеру виготовляється із сталі Ст3 товщиною 3 мм (рисунок 2.25 та 2.26). Ці деталі фіксують лінійні корпусні підшипники для переміщенні вздовж осі R та ремінь GT2 осі R, до неї також кріпляться ось  $\alpha$  з екструдером.

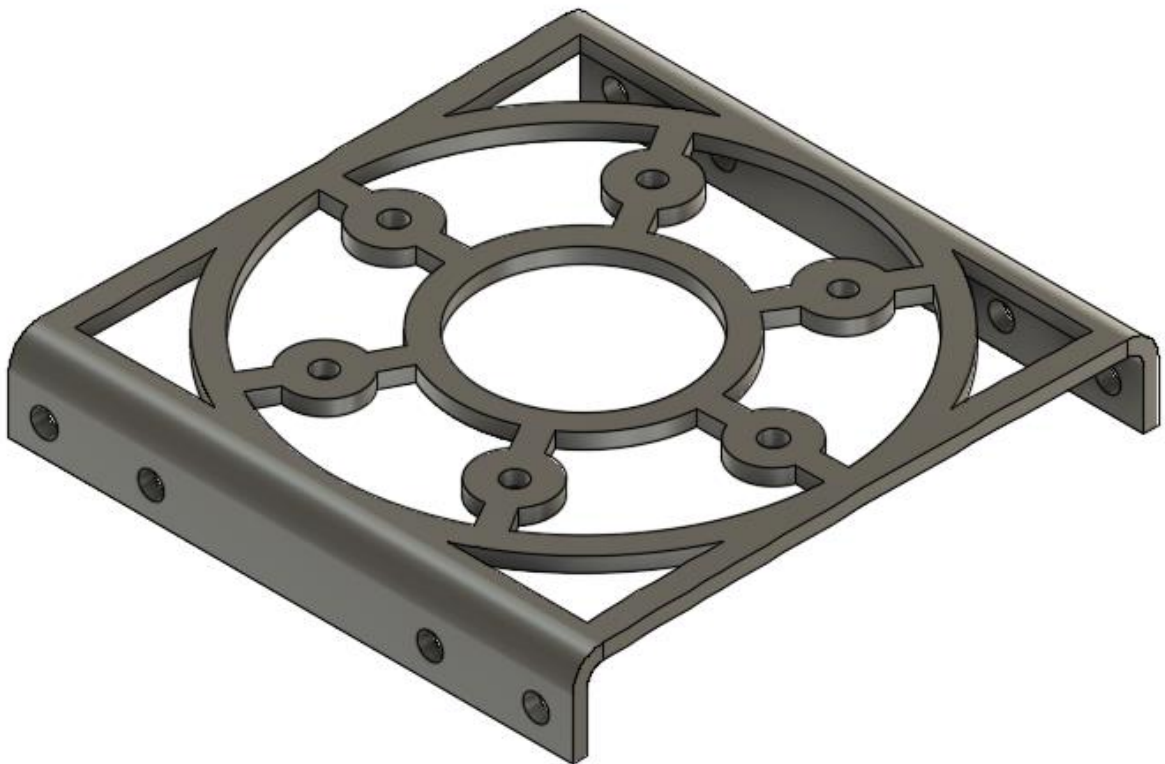


Рисунок 2.25 – Нижня та верхня частини корпусу каретки екструдеру

Частини корпусу виготовляються за допомогою лазерної різки та листової гнбки за стандартними правилами, внутрішній радіус дорівнює товщини листа, тобто 3 мм.

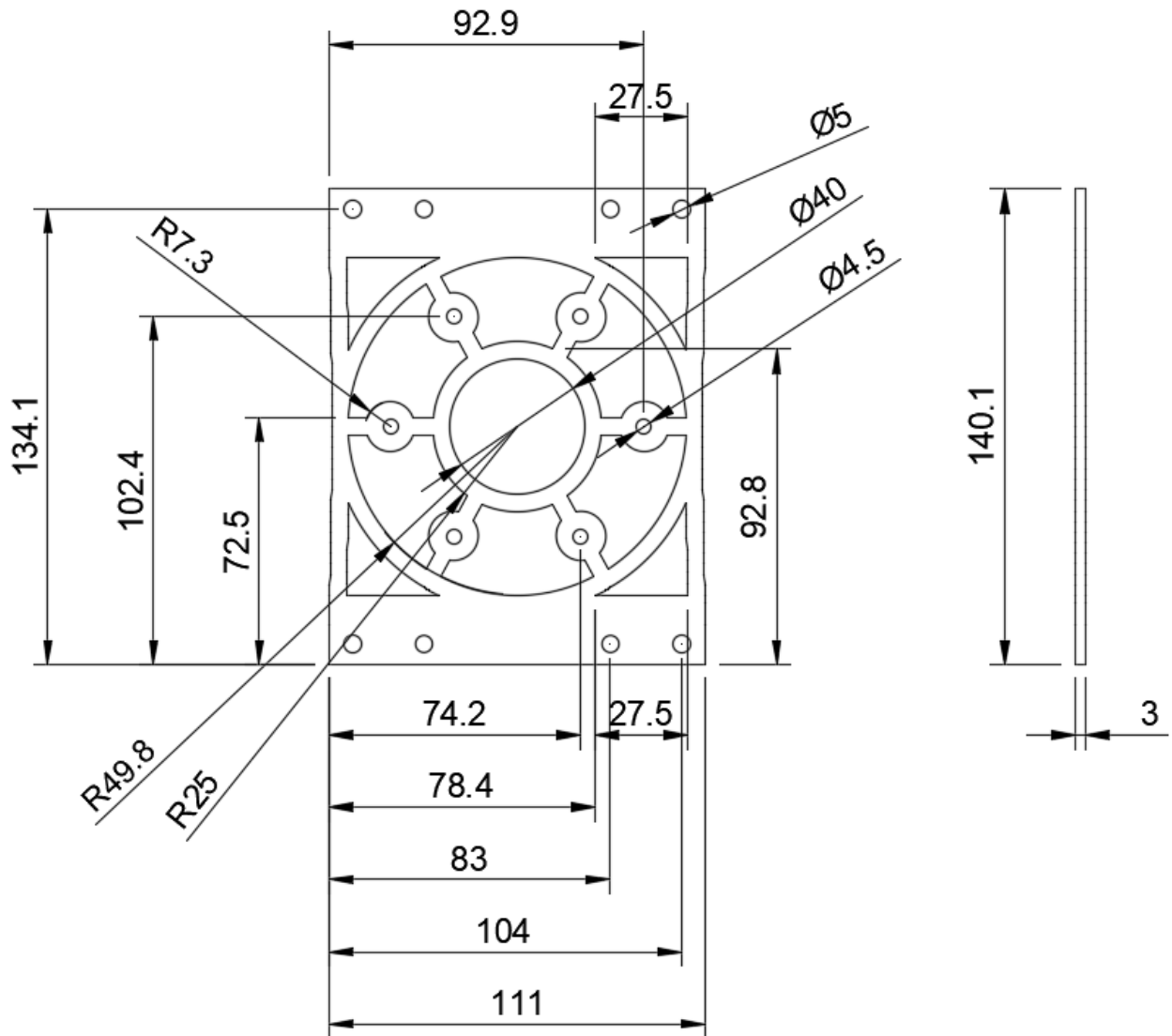


Рисунок 2.26 – Ескіз розгортки нижньої та верхньої частини корпусу каретки екструдеру

Нижня опора опозитного підшипника виготовляється із пластмаси PET (рисунок 2.27 та 2.28). Опора використовується для підтримки підшипників опозитного шківa ремінної передачі осі R та обмеження вертикального руху ременя.

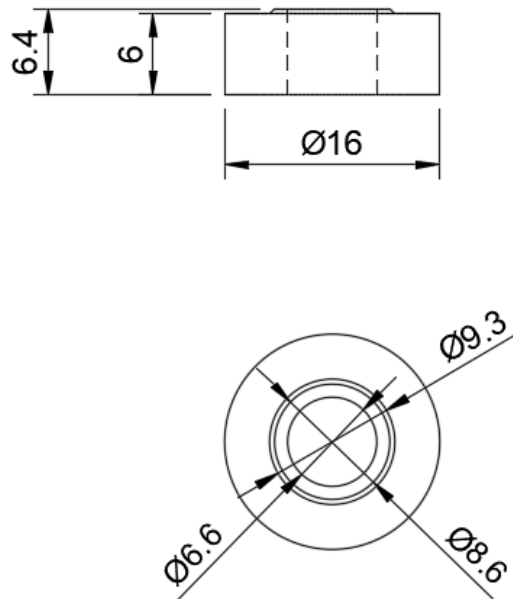


Рисунок 2.27 – Нижня опора опозитного підшипника

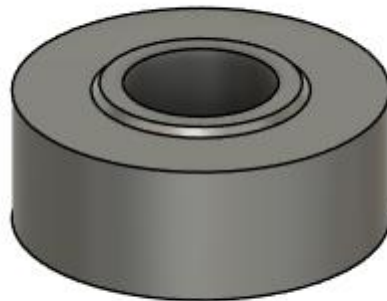


Рисунок 2.28 – Нижня опора опозитного підшипника

Нижня опора опозитного підшипника виготовляються за технологією FFF/FDM 3D друку.

Верхня опора опозитного підшипника виготовляється із пластмаси PET (рисунок 2.29 та 2.30). Опора використовується для підтримки підшипників опозитного шківів ремінної передачі осі R та обмеження вертикального руху ременя.

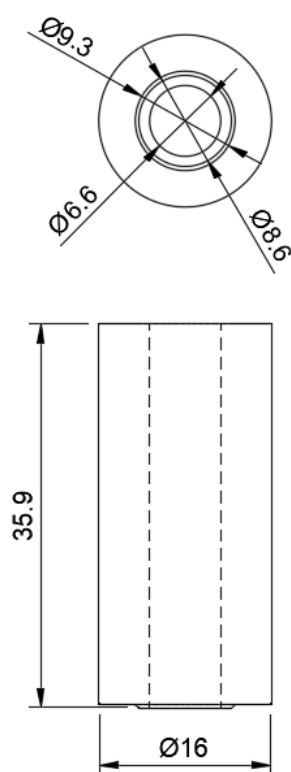


Рисунок 2.29 – Верхня опора опозитного підшипника



Рисунок 2.30 – Нижня опора опозитного підшипника

Верхня опора опозитного підшипника виготовляються за технологією FFF/FDM 3D друку.

Лівий та правий фіксатори ременю виготовляється із пластмаси PET (рисунок 2.31 та 2.32). Фіксатори кріпляться до нижньої частини корпусу каретки екструдера за допомогою гвинтів M2 DIN 912, використовуються для натягнення та фіксації ремені ременної передачі осі R.

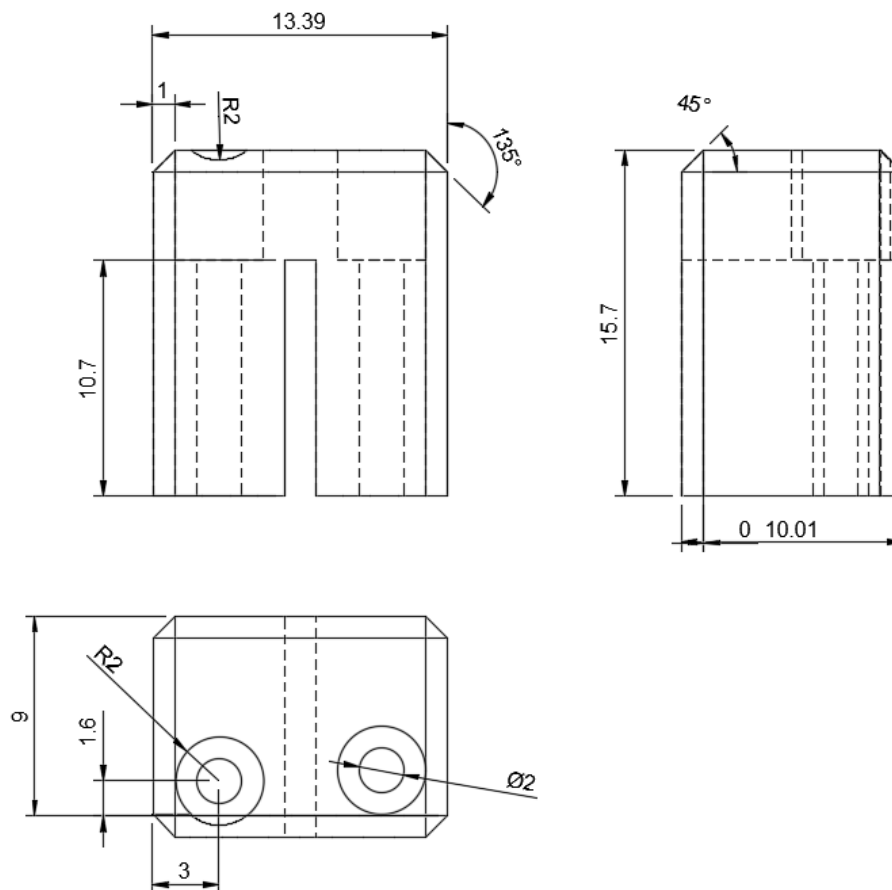


Рисунок 2.31 – Ескіз лівого та правого фіксатора ременю

Лівий та правий фіксатори ременю виготовляються за технологією FFF/FDM 3D друку.

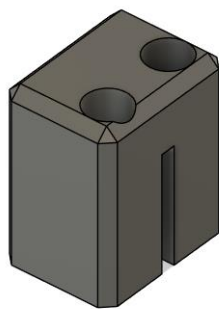


Рисунок 2.32 – Лівий та правий фіксатори ременю

## 2.6 Ось $\alpha$

Ось  $\alpha$  забезпечує обертання екструдеру навколо вертикальної осі для забезпечення друку без підтримок (рисунок 2.33 та 2.34). Для переміщення навколо вертикальної осі використовується зубчаста передача з використанням крокового двигуна Nema 14.



Рисунок 2.33 – Ось  $\alpha$



Рисунок 2.34 – Ескіз осі  $\alpha$

Ось  $\alpha$  (рисунок 3.35) містить наступні стандартні компоненти:

- кроковий двигун Nema 14 – 1 шт;
- екструдер E3D V6 – 1 шт;
- вентилятор 3010 24 В – 1 шт;
- упорний підшипник 51114 SKF 70 мм x 95 мм x 18 мм – 1 шт;
- підшипник 685ZZ 5 мм x 11 мм x 5 мм – 4 шт.

Гвинти, гайки, різьбові вставки.

До нестандартних деталей відносяться:

- водило–фіксатор, PET пластик – 1 шт;
- корпус осі  $\alpha$ , PET пластик – 1 шт;
- шестерні–сателіти, Nylon пластик – 2 шт;
- привідна шестерня, Nylon пластик – 1 шт;
- корпус–епіцикл, PET пластик – 1 шт;
- фіксатор упорного підшипника, PET пластик – 1 шт;
- фіксатор екструдеру, PET пластик – 1 шт.



Рисунок 2.35 – Вибух–схема осі  $\alpha$

Водило–фіксатор виготовляється із пластмаси PET (рисунок 2.36 та 2.37). Водило фіксатор використовується для кріплення всієї осі  $\alpha$  до нижньої частини

корпусу каретки екструдеру за допомогою 6 гвинтів M3 DIN912. Також на водилі-фіксаторі кріпляться два шестерні-сателіти що забезпечують рівномірність обертів вздовж вертикальної осі.

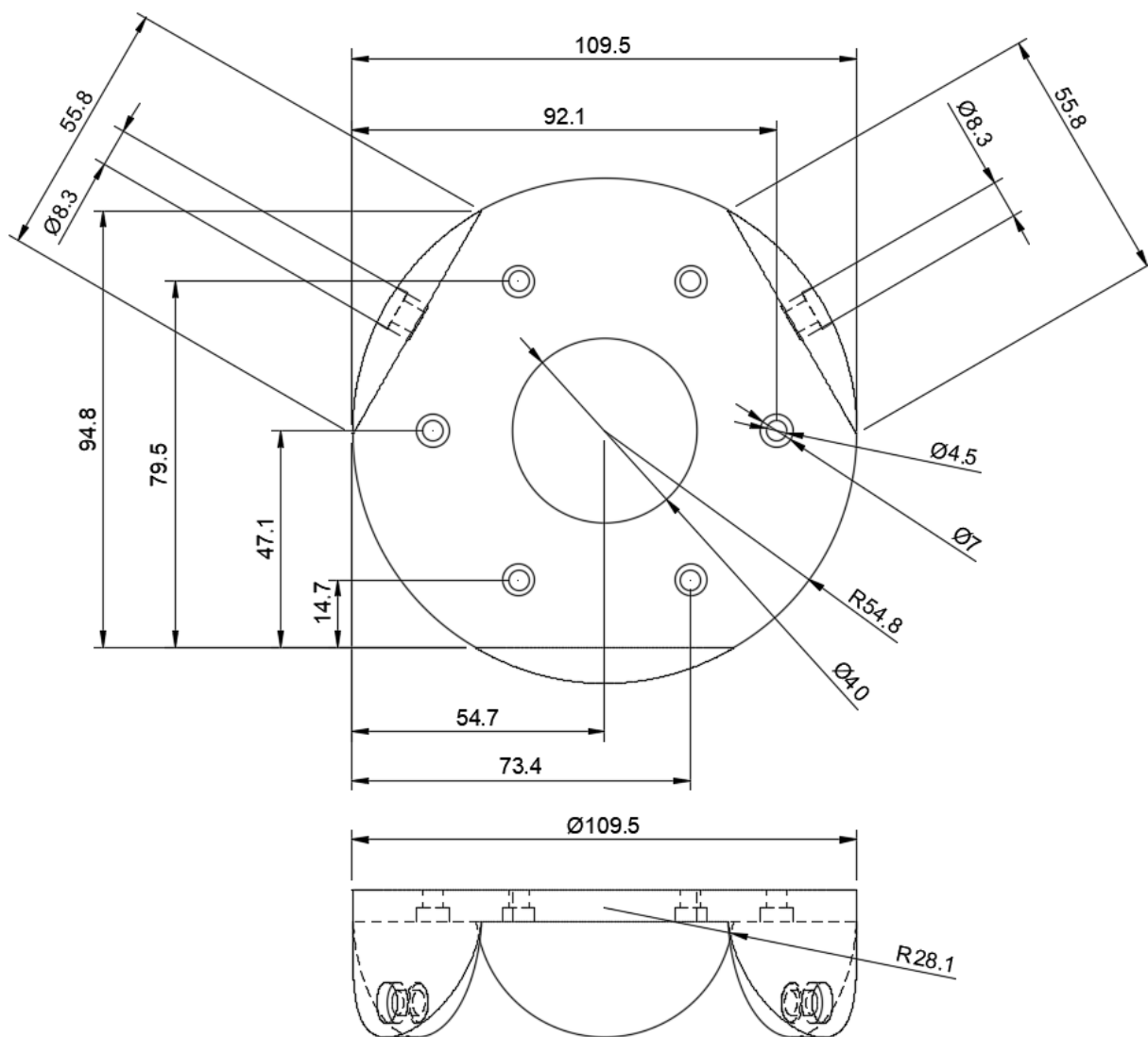


Рисунок 3.36 – Ескіз водила-фіксатора

Водило-фіксатор виготовляються за технологією FFF/FDM 3D друку.

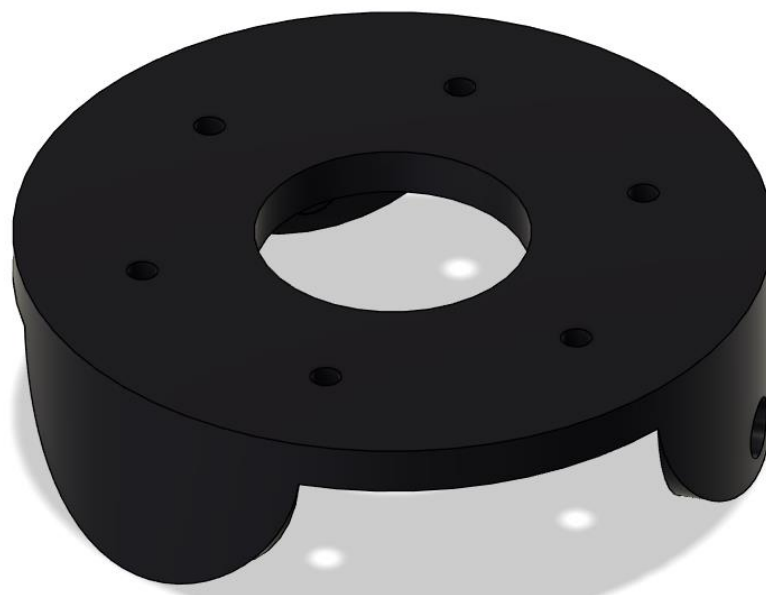


Рисунок 2.37 – Водило-фіксатор

Корпус осі  $\alpha$  (рисунки 2.38 та 2.39) є базовою деталлю, навколо якої збирається вся зборка, до якої кріпиться водило фіксатор, шестерні-сателіти, кроковий двигун Nema 14 та корпус-епіцикл. Всі деталі кріпляться за допомогою гвинтових з'єднань.



Рисунок 2.38 – Корпус осі  $\alpha$

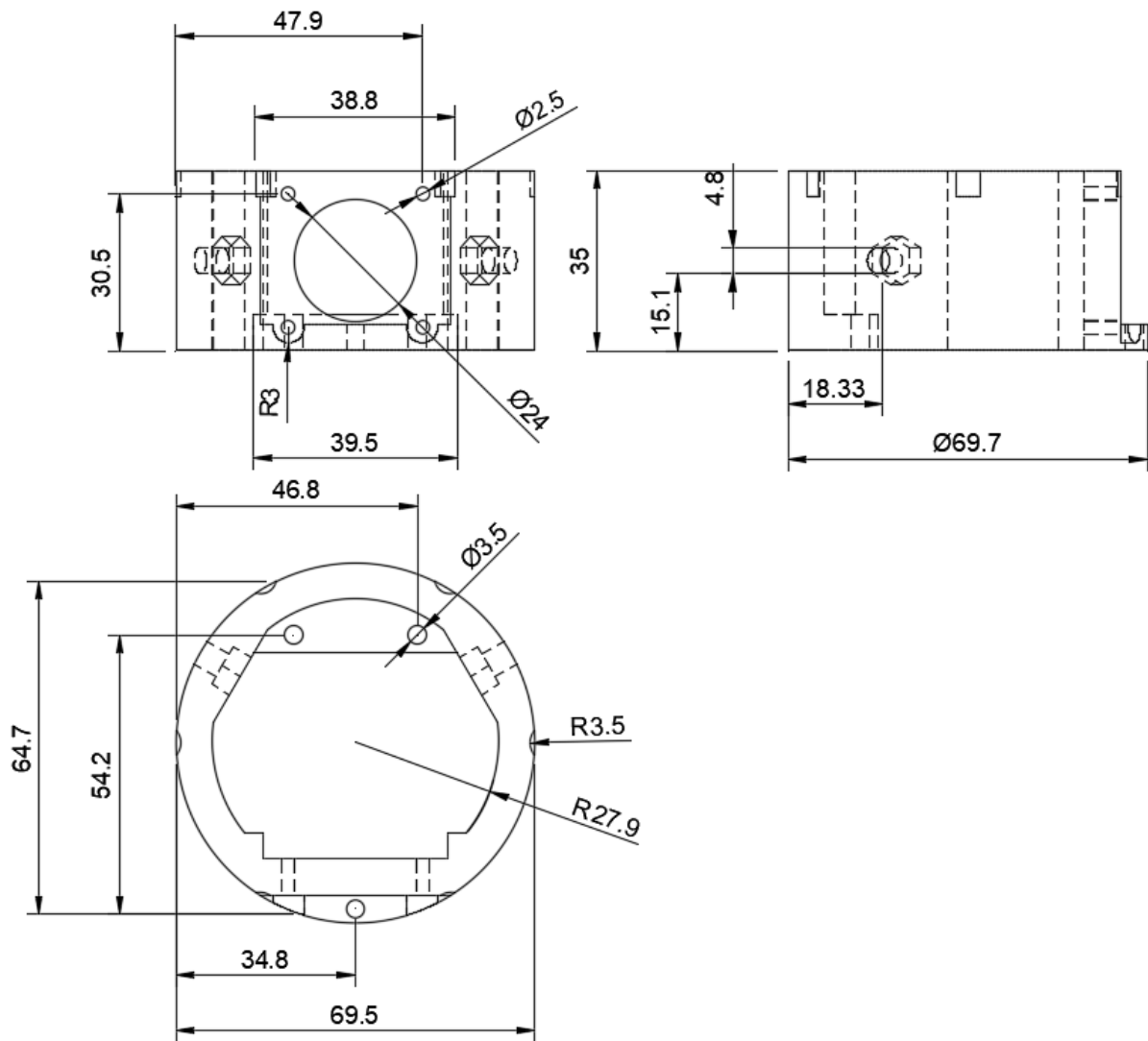


Рисунок 2.39 – Ескіз корпусу осі  $\alpha$

Корпусу осі  $\alpha$  виготовляються за технологією FFF/FDM 3D друку.

Шестерні–сателіти мають форму евольвенти, 24 зубця та виготовляються із Nylon пластику (рисунок 2.40 та 2.41). Індекс зубців 12.70. Шестерні фіксуються на водилі–фіксаторі рухаються по пазам корпусу–епіциклу для забезпечення рівномірного руху. В середині кожної шестерні–сателіти знаходиться пара підшипників 685ZZ з діаметром під роликами 5 мм, зовнішнім діаметром 11 мм та висотою 5 мм.

Шестерні–сателіти виготовляються за технологією FFF/FDM 3D друку.

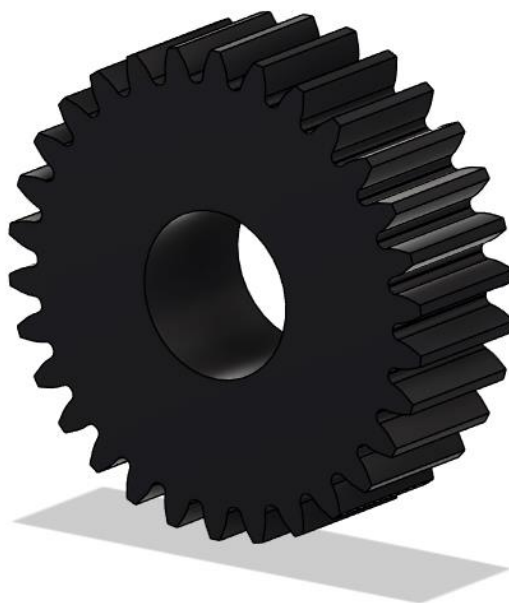


Рисунок 2.40 – Шестерня–сателіт

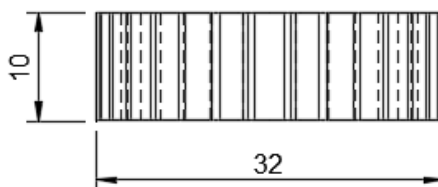
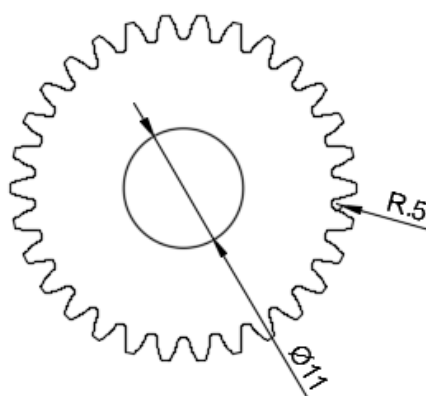


Рисунок 2.41 – Ескіз шестерні–сателіту

Привідна шестерня має форму евольвенти, 30 зубців та виготовляється із Nylon пластику (рисунок 2.42 та 2.43). Індекс зубців 12.70. Шестерні фіксуються

на валу крокового двигуна Nema 14 і є приводною шестернею механізму обертання навколо вертикальної осі.

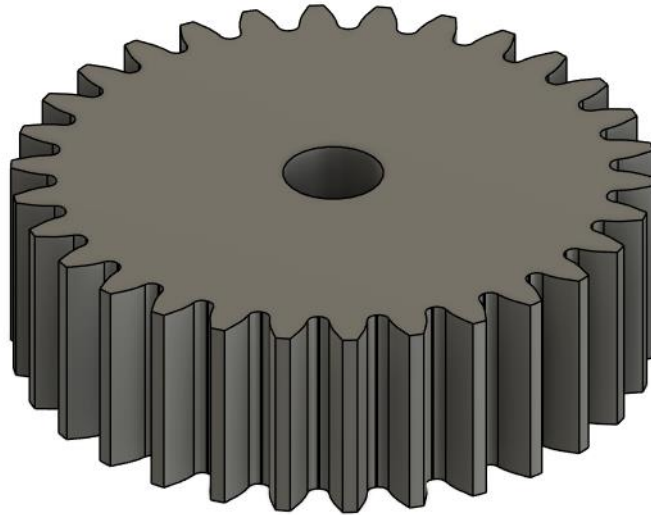


Рисунок 2.42 – Привідна шестерня

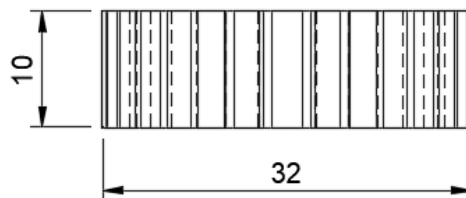
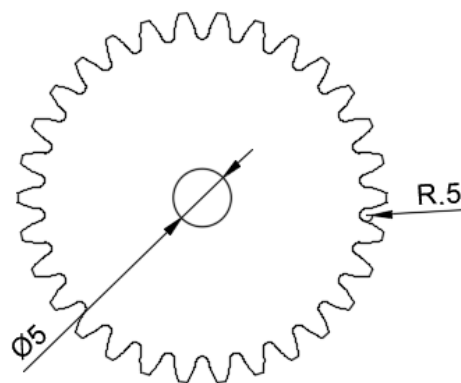


Рисунок 2.43 – Ескіз приводної шестерні

Привідна шестерня виготовлюється за технологією FFF/FDM 3D друку.

Корпус–епіцикл забезпечує фіксацію екструдера та його обертання навколо вертикальної осі (рисунок 2.44 та 2.45). На верхній площині корпусу–епіциклу знаходяться пази для контакту із привідною шестернею та шестернями–сателітами. Рівномірність руху корпусу–епіцикл також забезпечується завдяки упорному підшипнику 51114 SKF з внутрішнім діаметром 70 мм, зовнішнім діаметром 95 мм та висотою 18 мм.

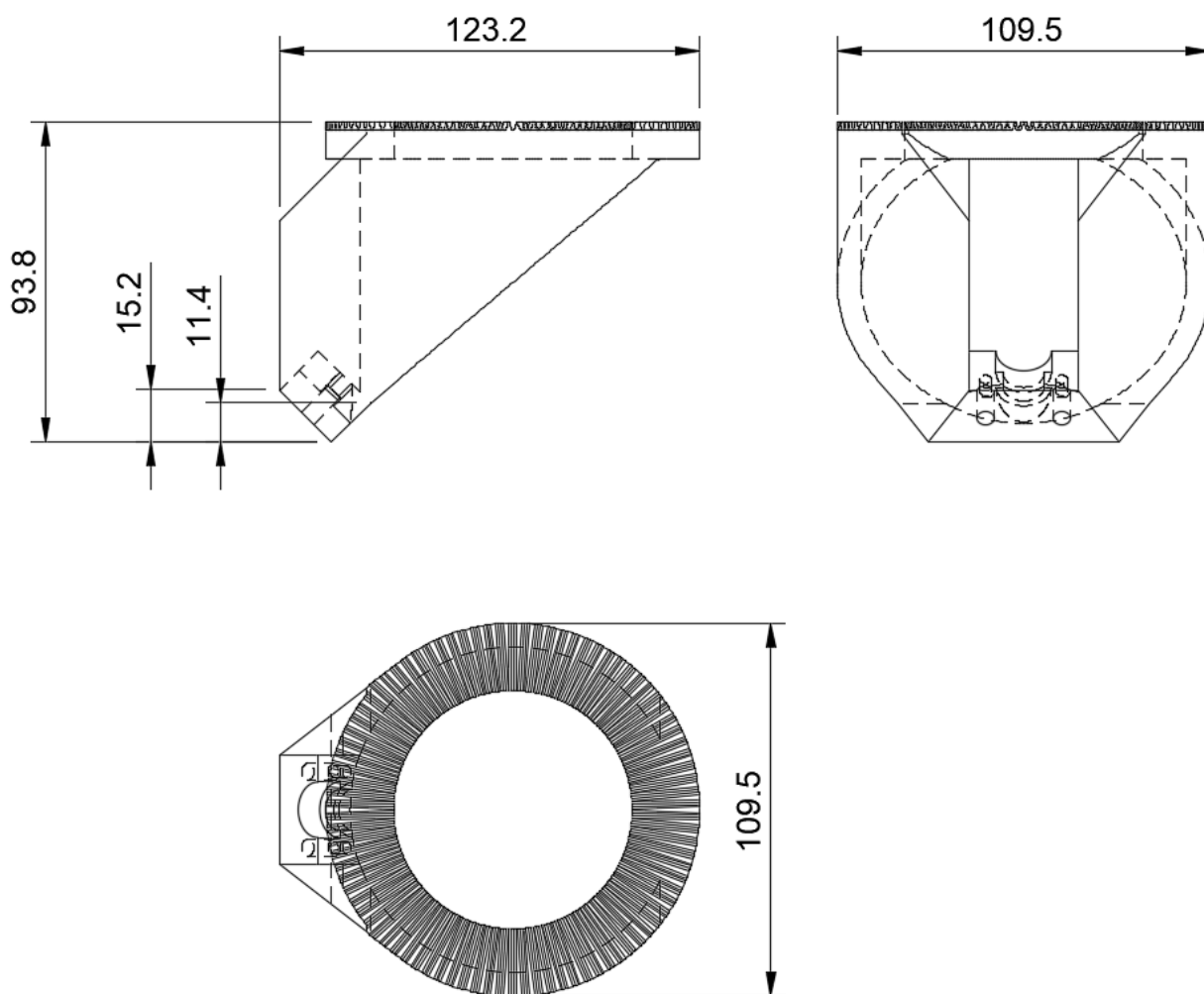


Рисунок 2.44 – Ескіз корпусу–епіциклу

Корпус–епіцикл виготовлюється за технологією FFF/FDM 3D друку.



Рисунок 2.45 – Корпус–епіцикл

Фіксатор упорного підшипника виготовляється із пластика PET (рисунок 2.46 та 2.47). Фіксатор забезпечую притиснення упорного підшипника 51114 SKF 70 мм x 95 мм x 18 мм до корпусу–епіциклу. З'єднання фіксатору упорного підшипника та корпусу–епіциклу відбувається за рахунок трьох гвинтових з'єднань.

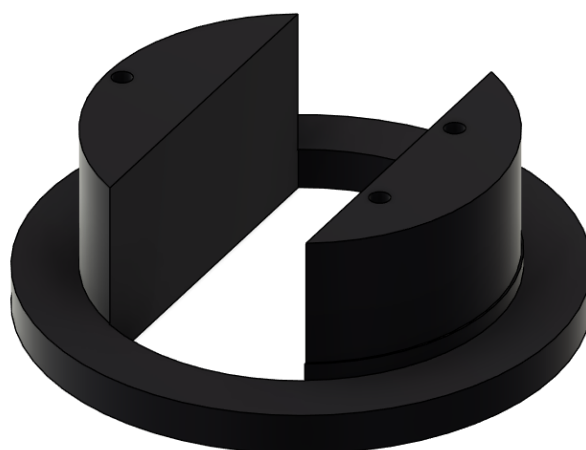


Рисунок 2.46 – Фіксатор упорного підшипника

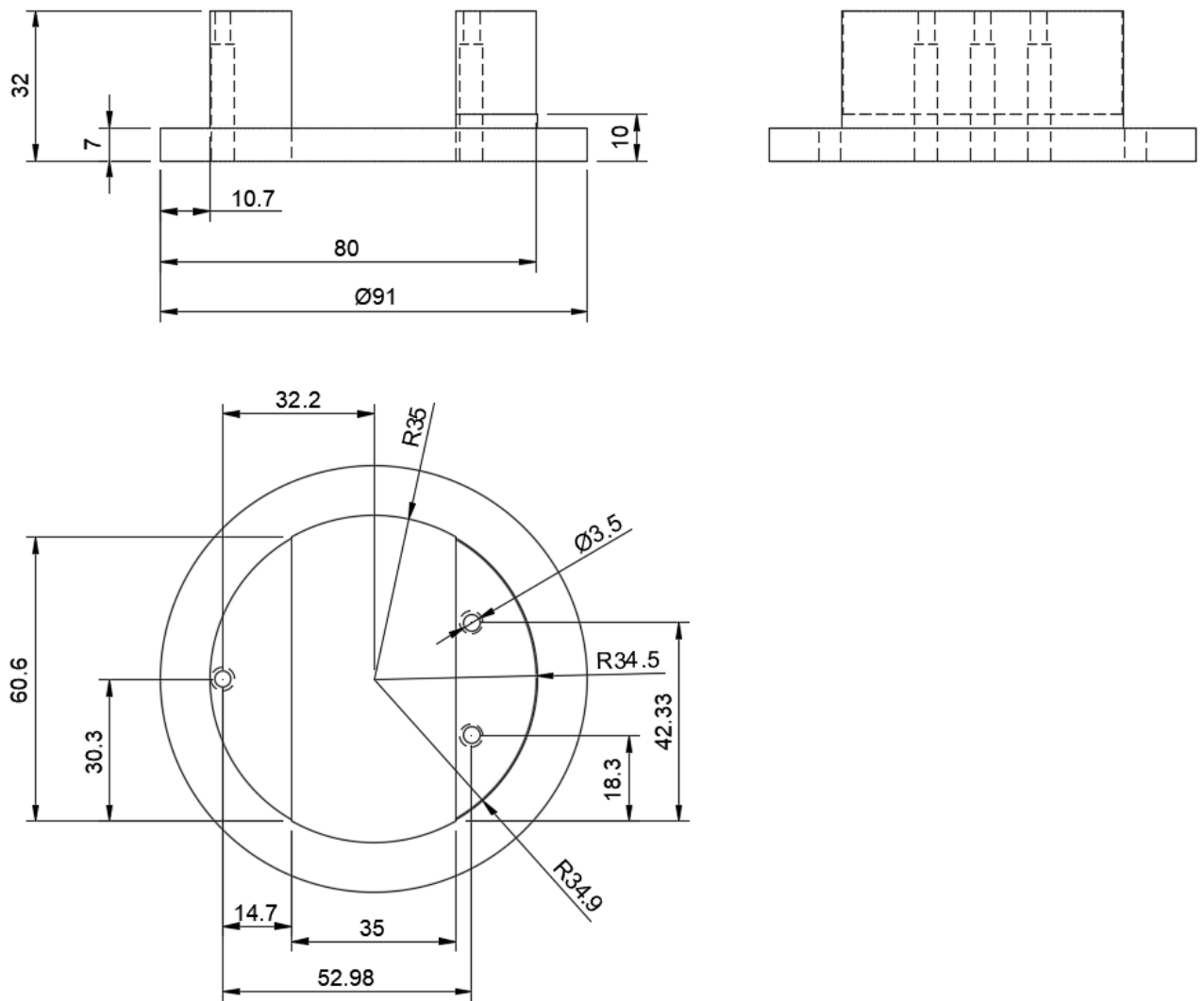


Рисунок 2.47 – Ескіз фіксатору упорного підшипника

Фіксатор упорного підшипника (рисунки 2.48 та 2.49) виготовлюється за технологією FFF/FDM 3D друку.

Фіксатор екструдеру виготовляється із пластмаси PET. Основні функції утримання екструдеру E3D V6 та кріплення вентилятору обдуву радіатору. Фіксатор екструдеру приєднується до корпусу-епіциклу за допомогою двох гвинтів M3 din912.

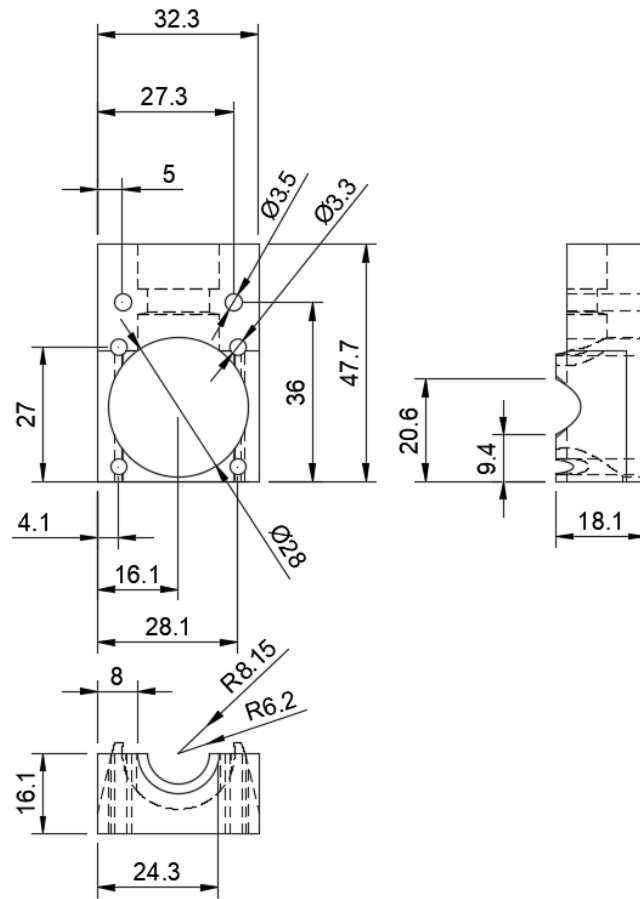


Рисунок 2.48 – Ескіз фіксатору екструдеру

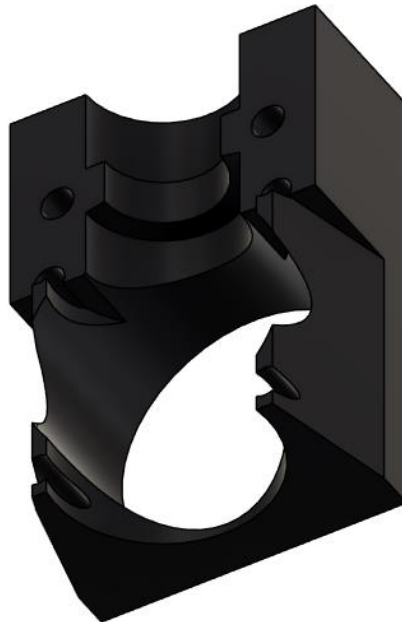


Рисунок 2.49 – Фіксатор екструдеру

Фіксатор екструдера виготовлюється за технологією FFF/FDM 3D друку.

## 2.7 Ось $\theta$

Ось  $\theta$  необхідна для обертання робочої платформи навколо вертикальної осі (рисунок 2.50 та 2.51). Робоча платформа має форму кола із діаметром 300 мм. Обертання відбувається завдяки кроковому двигуна Nema 17 приводного шківа із кількістю зубців 20 шт, опозитного шківа із кількістю зубців 60 шт та ремінної передачі GT2. Таке співвідношення зубців шківів викликано необхідністю зменшення навантаження на кроковий двигун через високу вагу платформи.

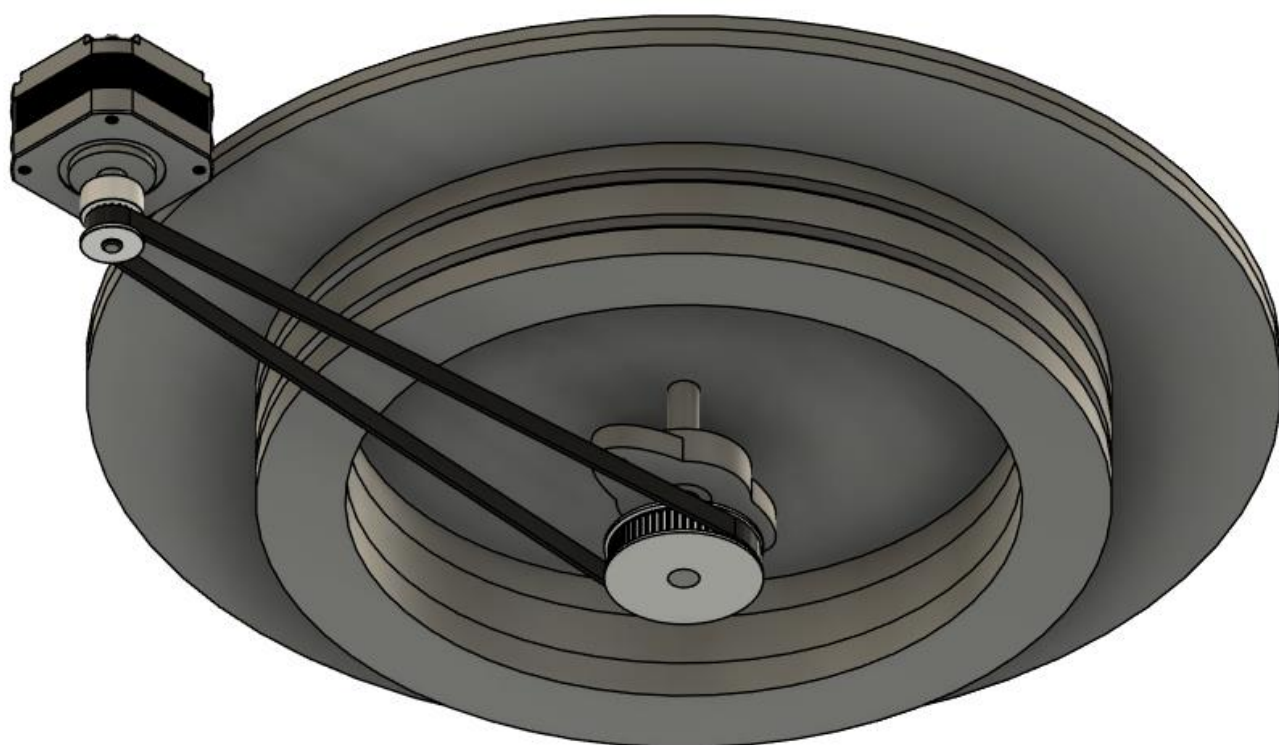


Рисунок 2.50 – Ось  $\theta$

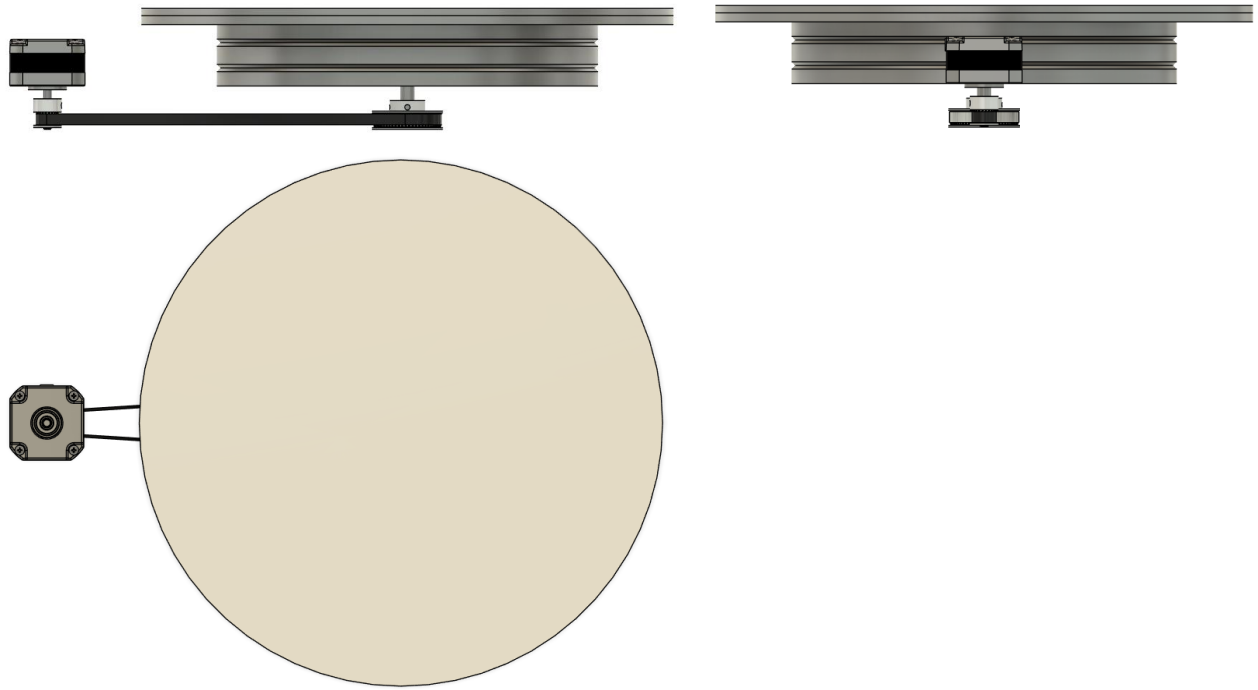


Рисунок 2.51 – Ескіз осі  $\theta$

Ось  $\theta$  (рисунок 2.52) складається із наступних стандартних деталей:

- кроковий двигун Nema 17 – 1 шт;
- шків зубчатий 20 зубців – 1 шт;
- ремінь GT2 шириною 6 мм кільцевий, довжиною 400 мм – 1 шт;
- шків зубчатий 60 зубців – 1 шт;
- підшипник MR148–ZZ 8 мм x 14 мм x 4 мм – 1 шт;
- підшипник упорний 85 мм x 215 мм x 34 мм – 1 шт.

Ось  $\theta$  складається із наступних нестандартних деталей:

- корпус підшипника, PET пластик – 1шт;
- платформа, алюміній – 1 шт;
- поверхня друку, скло –1 шт.

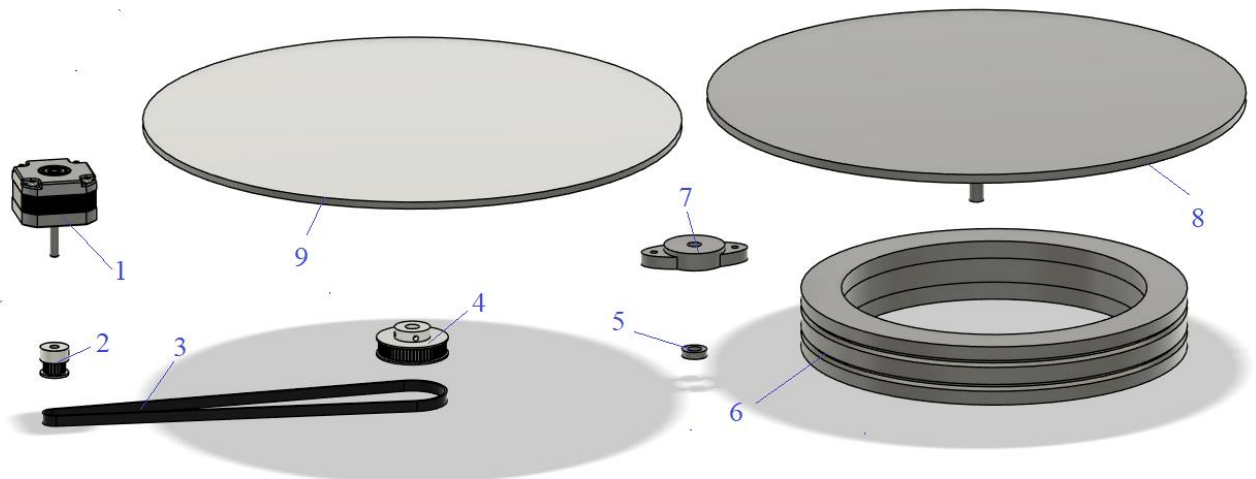


Рисунок 2.52 – Вибух–схема осі  $\theta$

Корпус підшипника виготовляється із пластмаси PET, він необхідний для фіксації підшипника MR148–ZZ 8 мм x 14 мм x 4 мм, що забезпечує стабільність осі обертання платформи (рисунок 2.53 та 2.54). Технологія виготовлення 3D друк FDM/FFF.

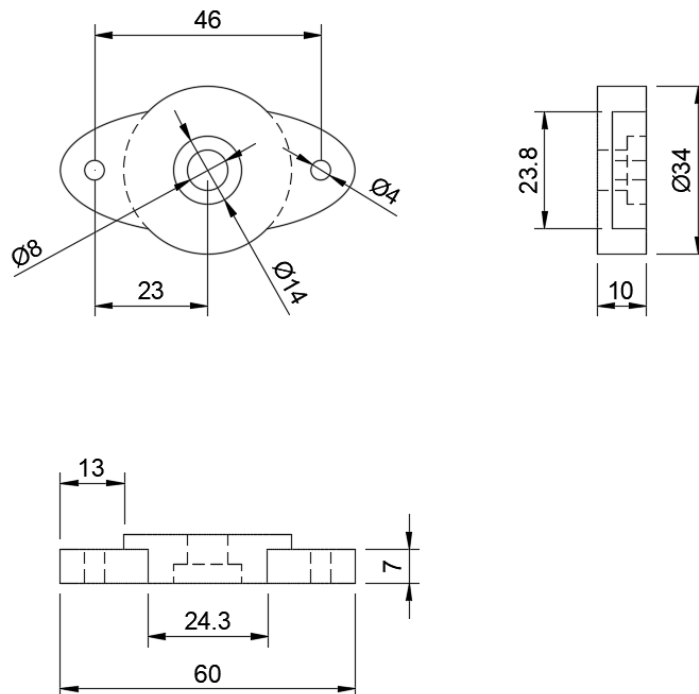


Рисунок 2.53 – Ескіз корпусу підшипнику

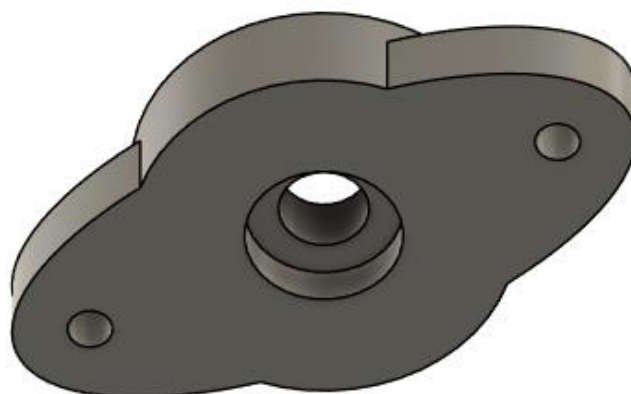


Рисунок 2.54 – Корпус підшипника

Платформа друку виготовляється із сплаву алюмінію 60661 (рисунок 2.55 та 2.56). Вибір матеріалу зумовлено необхідністю високої теплопровідності, малої ваги та жорсткості конструкції. В центрі платформи впресовано та закріплено вал діаметром 8 мм. Платформа притискається до упорного підшипника, а вал проходить скрізь внутрішній отвір підшипника MR148-ZZ. Диск платформи виготовляється з листового алюмінію лазерним різанням.

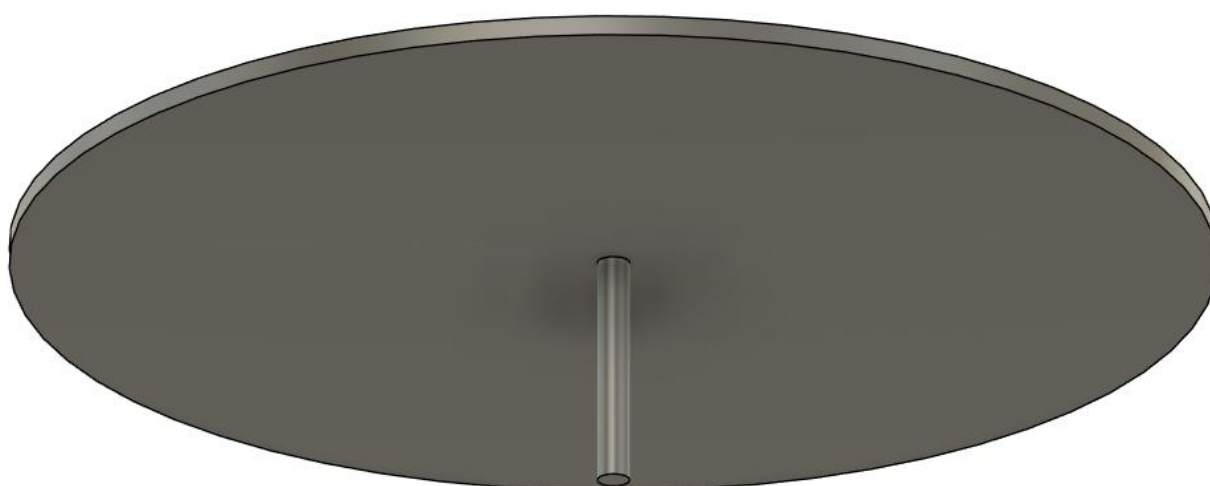


Рисунок 2.55 – Платформа

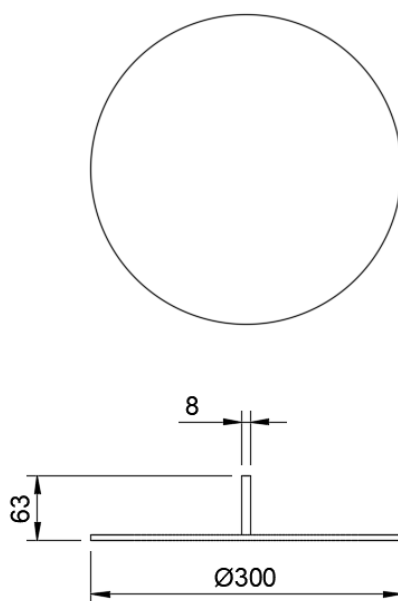


Рисунок 2.56 – Ескіз платформи

Поверхня друку може бути виготовлена із різноманітних матеріалів, у даній 3D моделі передбачено використання скла товщиною 4 мм (рисунок 2.57 та 2.58).

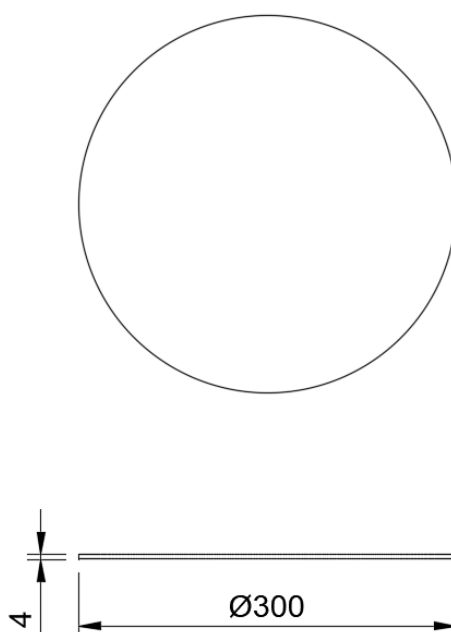


Рисунок 2.57 – Ескіз поверхні друку.

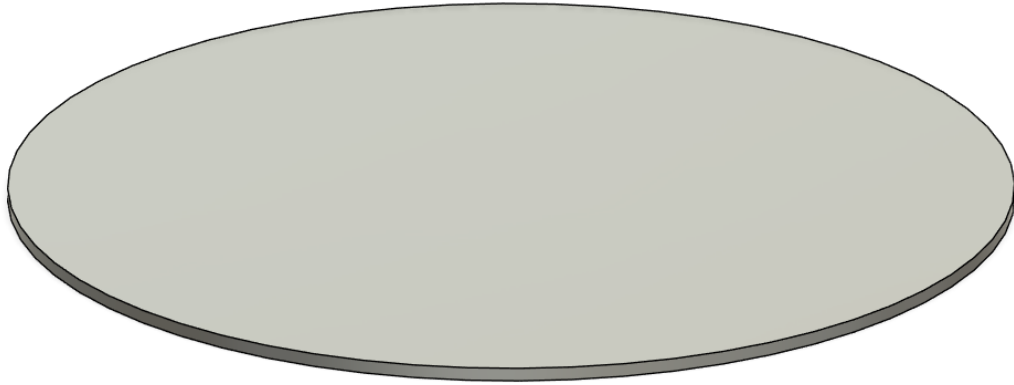


Рисунок 2.58 – Поверхня друку

## 2.8 Висновки до другого розділу

В результаті проектних робіт було розроблено 3D модель 3D принтера, що працює в циліндричній системі координат і дозволяє виконувати друк без підтримок. Можливість виготовлення деталей без підтримок забезпечена розташуванням екструдера під кутом  $45^\circ$  та додатковим ступенем свободи, а саме обертанням екструдера навколо горизонтальної осі.

## 3 АДАПТАЦІЯ MESH ФАЙЛІВ ДЛЯ ДРУКУ БЕЗ ПІДТРИМОК

### 3.1 Структура mesh файлів

Меш–моделі (mesh models) є однією з найпоширеніших форм представлення тривимірних об'єктів у комп'ютерній графіці, інженерному дизайні та CAD (Computer–Aided Design). Меш–модель складається з множини точок, з'єднаних між собою за допомогою ребер та трикутників або інших багатокутників, які формують поверхню тривимірного об'єкта. Основні елементи, які використовуються для побудови меш–моделей:

- вершини (Vertices) – це точки у тривимірному просторі, що задають положення кожної частини моделі;
- ребра (Edges) – прямі лінії, що з'єднують дві вершини;
- грані (Faces) – площини, які утворюються з кількох з'єднаних ребер (зазвичай трикутні або чотирикутні багатокутники).

Mesh–моделі бувають двох видів полігональні та поверхневі.

Полігональні моделі складаються з вершин, ребер і граней, які утворюють багатокутники. Це найпоширеніший тип меш–моделі, який використовують у 3D–моделюванні для комп'ютерної графіки та ігор. Зазвичай полігональні моделі складаються з трикутників або чотирикутників (квадів), які легко обробляти в графічних процесорах (GPU). Більшість 3D–моделей у комп'ютерних іграх, фільмах і програмах для моделювання – це саме полігональні меші.

Основні підтипи:

- трикутникові меші (Triangular Meshes): найпоширеніший вид, де кожна грань є трикутником. Вони ефективні для рендерингу і широко використовуються в GPU;
- квадратні меші (Quad Meshes): побудовані з чотирикутників, зазвичай використовуються для згладжування поверхонь (наприклад, у скульптурі та анімації);

– багатокутові меші (N-gon Meshes): включають грані з більш ніж чотирма вершинами, хоча вони складніші для обробки і рідше використовуються в реальному часі;

Поверхневі меш-моделі (Surface Meshes) призначені для моделювання складних поверхонь. Вони створюються на основі математичних функцій для згладженого подання поверхні об'єкта. Поверхневі меші часто використовуються у високоточних наукових та інженерних розрахунках, де важливо зберігати інформацію про кривизну та гладження поверхні [12].

Тетрадральні та гексадральні меші (Tetrahedral and Hexahedral Meshes) використовуються в інженерних симуляціях (наприклад, методом кінцевих елементів), де важливо враховувати не лише поверхню, але й внутрішню структуру об'єкта. Тетрадральні меші складаються з тетраедрів (четвертних полігонів), а гексадральні – з гексагонів (шестикутників). Вони корисні для симуляцій деформації, теплових або механічних властивостей об'єктів.

Найбільш поширеними mesh форматами є triple-mesh – STL та quadro-mesh – OBJ. Формати STL та OBJ широко використовуються для зберігання тривимірних моделей, але вони мають різні характеристики і переваги залежно від контексту використання.

STL (STereoLithography) – це формат файлу, створений для тривимірного моделювання та використання в адитивному виробництві, зокрема для 3D-друку. Цей формат був розроблений компанією 3D Systems ще в 1987 році і став стандартом у сфері 3D-друку. STL зберігає інформацію про поверхню об'єкта, представляючи її як сітку трикутників.

OBJ – це формат файлу, розроблений компанією Wavefront Technologies для зберігання 3D-моделей. На відміну від STL, OBJ може містити не лише геометрію поверхні об'єкта, а й текстури, кольори та матеріали, що робить його більш гнучким для використання в комп'ютерній графіці та анімації.

STL формат є більш поширеним у виробництві ніж OBJ через наступні переваги:

– простота та легкість формату. STL є набагато простішим за OBJ, оскільки він зберігає лише інформацію про геометрію поверхні у вигляді трикутників (координати вершин і нормалі). Це робить STL-файли легшими за обсягом і зручними для роботи, особливо в середовищі 3D-друку, де не потрібні текстури або матеріали. OBJ, навпаки, зберігає більше даних, таких як текстури, кольори, матеріали та координати UV. Це робить його більш важким і складнішим для обробки, якщо такі деталі не є необхідними;

– підтримка у 3D-друці. STL став стандартом у сфері 3D-друку, і майже всі програми для підготовки моделей до друку підтримують цей формат. Більшість 3D-принтерів працюють саме зі STL-файлами через їх простоту й універсальність. Вони чудово підходять для розрахунку траєкторій екструдера та інших параметрів друку. OBJ також підтримується у 3D-друку, але не так широко. Через складність даних, що містяться у файлі OBJ (текстури, кольори), цей формат частіше використовується в комп'ютерній графіці, а не в інженерному середовищі чи виробництві;

– легкість обробки. STL-файли легше обробляти для простих і регулярних об'єктів, оскільки вони не містять додаткових даних, таких як текстури чи матеріали. Це робить їх ідеальними для додатків, де важлива швидкість обробки та де геометрія є основним аспектом, як у випадку з 3D-друком або інженерними симуляціями. OBJ потребує більше часу для обробки через наявність текстурних координат і даних про матеріали, що ускладнює роботу з файлами, коли ці деталі не потрібні;

– менший розмір файлу. Оскільки STL зберігає лише геометрію об'єкта у вигляді трикутників, розмір STL-файлів зазвичай менший, ніж у OBJ, особливо якщо мова йде про прості об'єкти без складних текстур або деталей. Менший розмір файлу прискорює завантаження та передачу даних, що особливо важливо при роботі з великими проектами у сфері 3D-друку. OBJ може зберігати текстуровані моделі, що збільшує розмір файлу, особливо якщо модель має складні текстури та матеріали;

– поширеність у технічних галузях. STL є популярним форматом у технічних галузях, таких як механіка, архітектура, медицина та інженерія, де моделі використовуються для 3D-друку або симуляцій. Простота та універсальність STL роблять його оптимальним вибором для цих сфер, де важливий лише облік геометрії об'єкта. OBJ більше використовується у комп'ютерній графіці, кінематографі та ігровій індустрії, де є потреба в детальнішій візуалізації, а також використанні текстур і матеріалів;

– сумісність із програмами для 3D-друку. STL сумісний із більшістю програм для підготовки моделей до 3D-друку (так звані slicers), таких як Cura, PrusaSlicer, Simplify3D тощо. Ці програми автоматично розбивають STL-модель на шари та генерують інструкції для 3D-принтерів. OBJ, хоч і підтримується деякими програмами для друку, не настільки широко використовується, що може викликати проблеми з сумісністю або додаткові труднощі при налаштуванні друку.

Тож розробку методики адаптації mesh файлів для друку без підтримок буде проведено саме для STL формату.

Файл STL містить опис моделі, що складається із набору координат трьох точок по трьох осях. Кожна група із трьох точок утворює полігон, у цьому форматі він називається фасет (рисунок 3.1).

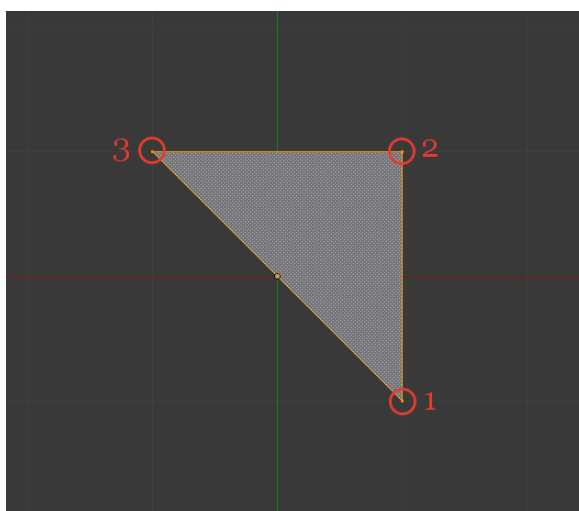


Рисунок 3.1 – Фасет формату STL

STL-файл може бути текстовим або бінарним [13]. Бінарний файл може нести інформацію про колір моделі. Текстовий файл цього не може. Також текстовий файл відрізняється від бінарного за розміром у бік. Звичайно текстовий файл можна конвертувати в бінарний. Один з найпростіших способів зробити це, відкрити текстовий файл у будь-якій (відповідній) 3D програмі та експортувати або зберегти його у STL формат.

Для побудови моделі у цьому форматі потрібні координати ключових точок. Наприклад потрібно побудувати трикутник-фасет з координатами:

v 1 1 0

v 1 -1 0

v -1 -1 0

Фасет, що утворено наведеними координатами представлено на рисунку 3.2.

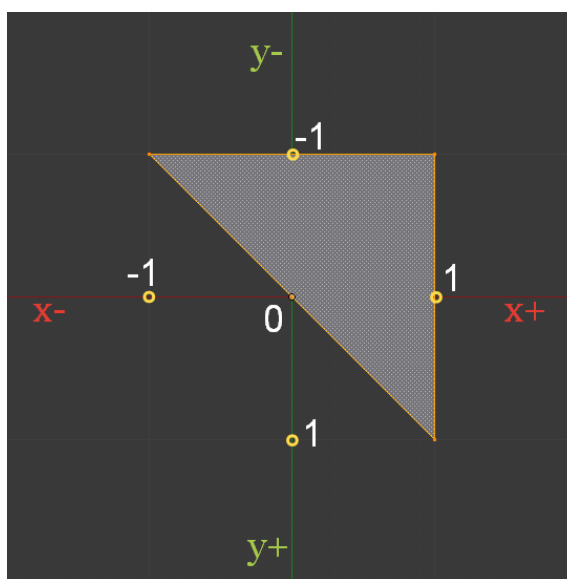


Рисунок 3.2 – Фасет по координатах

Порядок опису вершин важливий, тому що від цього залежить орієнтація нормалі. Нумерація виконується за правилом правої руки. Піднятий великий палець визначає напрямок нормалі, а зігнуті чотири пальці, напрямок нумерації та порядок опису вершин. Іншими словами, якщо необхідно, щоб фасет був звернений до нас, описувати його вершини потрібно проти годинникової стрілки.

На рисунку 3.3 зображено напрямок фасету за правилом правої руки та на малюнку 3.4 лістинг STL для трикутника.

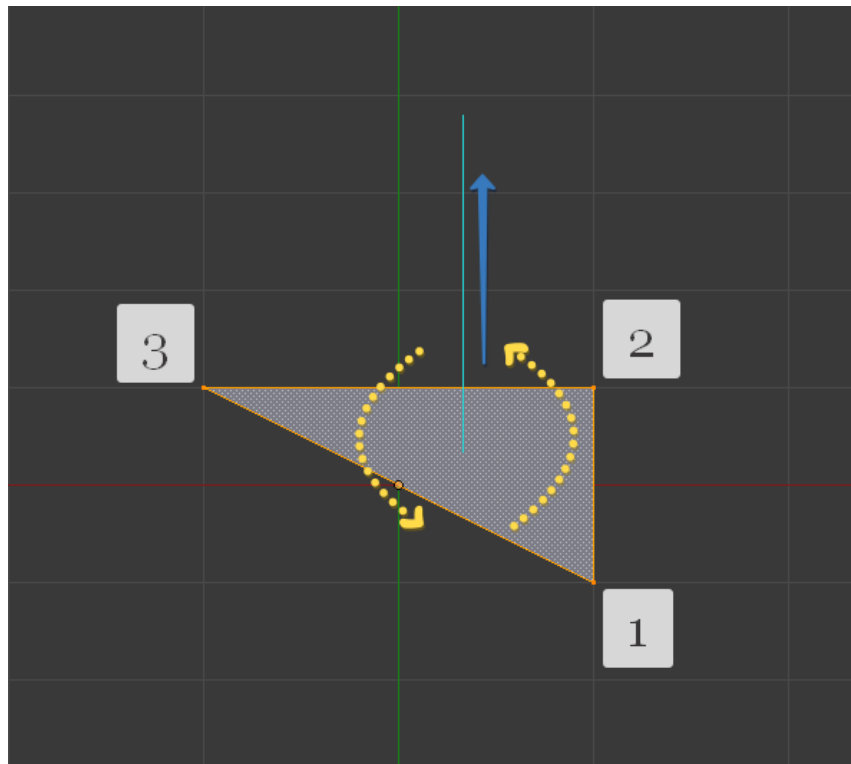


Рисунок 3.3 – Напрямок фасету

```
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 1 1 0
vertex 1 -1 0
vertex -1 -1 0
endloop
endfacet
```

Рисунок 3.4 – Лістинг STL, що описує трикутник

В STL також є компонент, що відповідає за орієнтацію нормалей – `facet normal n1 n2 n3`. Але оскільки переважна більшість використовує лише правило правої руки, його параметри зазвичай дорівнюють нулю (`facet normal 0 0 0`). А для деяких програм його наявність зовсім необов'язкова.

Для демонстрації розглянемо піраміду (рисунок 3.5). Піраміда, якщо дивитися на неї зверху вниз, представляє собою чотири прямокутники вершини яких з'єднані в одній точці.

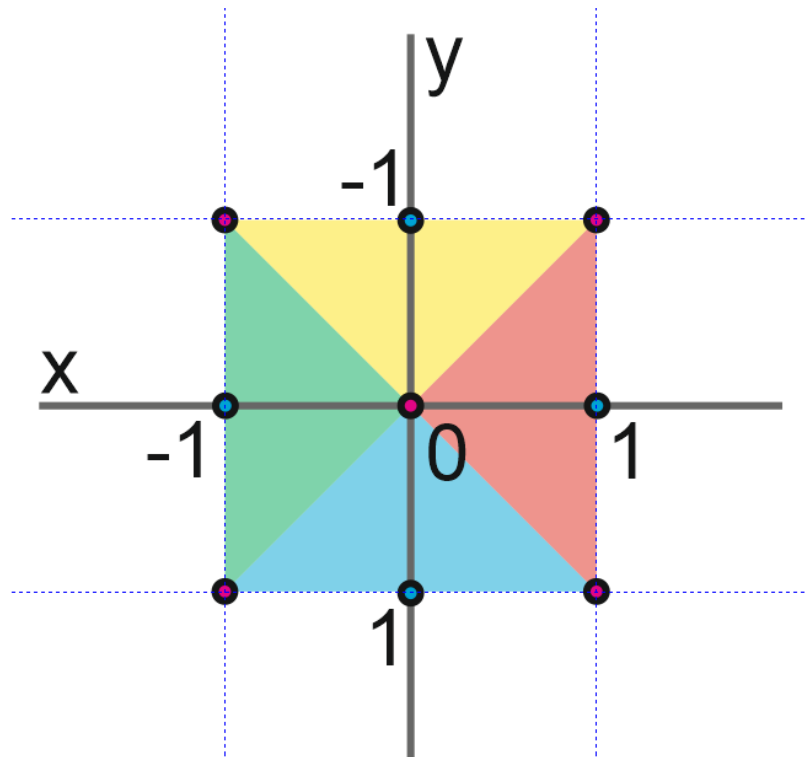


Рисунок 3.5 – Побудова піраміди в форматі STL

Дотримуючись правила правої правої руки, моделюємо піраміду починаючи з червоного трикутника.

На рисунку 3.6 наведено лістинг STL для піраміди.

```
facet normal 0 0 0  
outer loop  
vertex 0 0 0  
vertex 1 1 0  
vertex 1 -1 0  
endloop  
endfacet
```

```
facet normal 0 0 0  
outer loop  
vertex 0 0 0  
vertex 1 -1 0  
vertex -1 -1 0  
endloop  
endfacet
```

```
facet normal 0 0 0  
outer loop  
vertex 0 0 0  
vertex -1 -1 0  
vertex -1 1 0  
endloop  
endfacet
```

```
facet normal 0 0 0  
outer loop  
vertex 0 0 0  
vertex -1 1 0  
vertex 1 1 0  
endloop  
endfacet
```

Рисунок 3.6 – Опис піраміди в форматі STL

Результат наведений на рисунку 3.7.

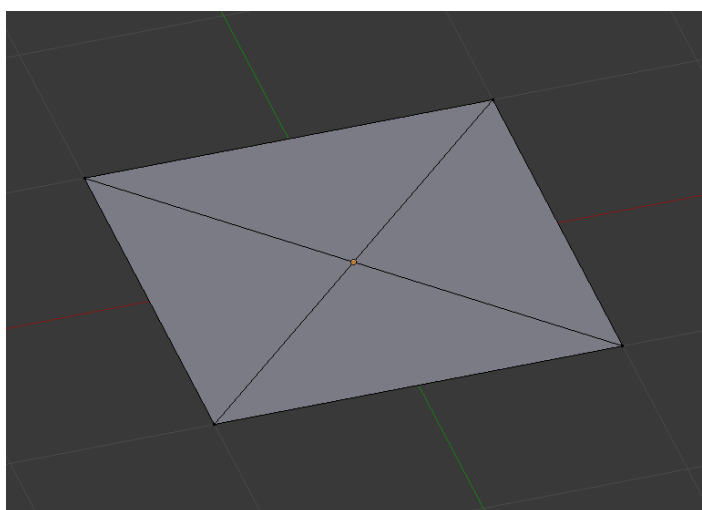


Рисунок 3.7 – Візуалізація STL

Результат має вигляд квадрату тому що центральна точка має таку ж координату Z як інші, виправимо це. Нижче правильний лістинг файлу та візуалізацію на рисунку 3.8:

```
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 0 0 -1
vertex 1 1 0
vertex 1 -1 0
endloop
endfacet
```

```
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 0 0 -1
vertex 1 -1 0
vertex -1 -1 0
endloop
endfacet
```

```
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 0 0 -1
vertex -1 -1 0
vertex -1 1 0
endloop
endfacet
```

```
facet normal 0 0 0
outer loop
```

```
vertex 0 0 -1  
vertex -1 1 0  
vertex 1 1 0  
endloop  
endfacet
```

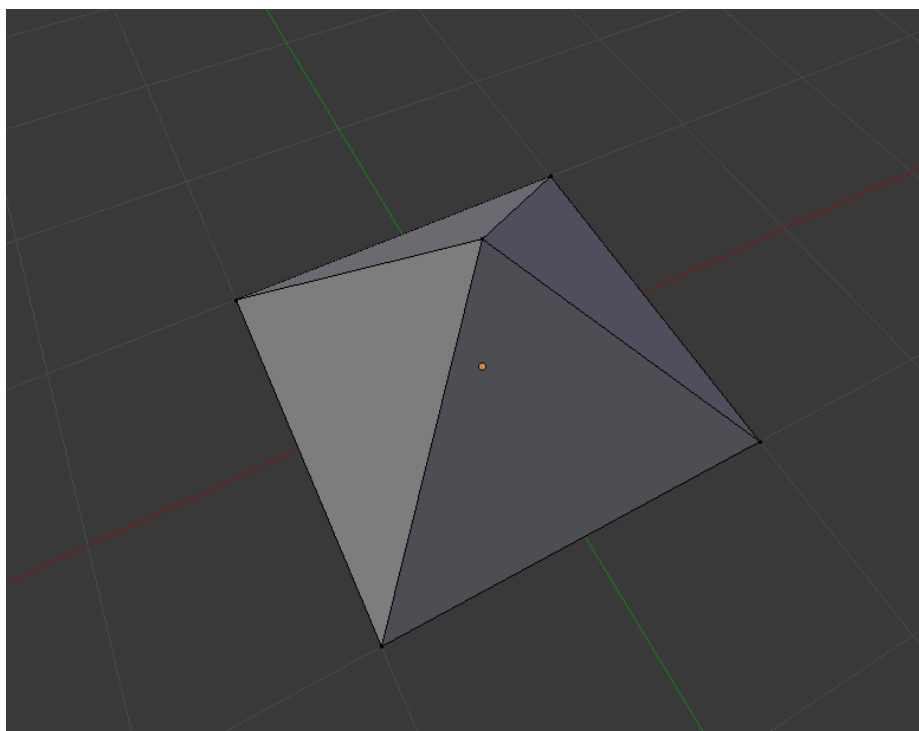


Рисунок 3.8 – Візуалізація лістингу

### 3.2 Розробка алгоритму адаптації mesh файлів

Через нестандартну конструкцію 3D принтера, а саме похилий екструдер та наявність додаткової осі обертання екструдеру, стандартні слайсери, що генерують G-код для FFF/FDM 3D принтерів, не можуть виконати генерацію. Тож є два варіанти. Або створення нового слайсеру, що є складною задачею, що вимагає велику кількість часу. Або адаптація STL моделі до особливостей 3D принтера, що розроблено.

У другому випадку необхідно виконати так званий конічний слайсинг (рисунок 3.9). Конічне нарізання полягає у наступному:

- попередня предеформація файлу STL;
- нарізка цього попередньо предеформованого STL у звичайному слайсері;
- зворотне перетворення G-коду.

Конічний GCode.

Предеформація робиться для того, щоб звичайний слайсер міг згенерувати конічний gcode. Для цього всі точки сітки переміщуються вгору в напрямку z, залежно від їх відстані від визначеної осі обертання. Цей процес призводить до конічної деформації частини під кутом  $45^\circ$  відповідно до конструкції принтера, що розроблено (рисунок 3.9).

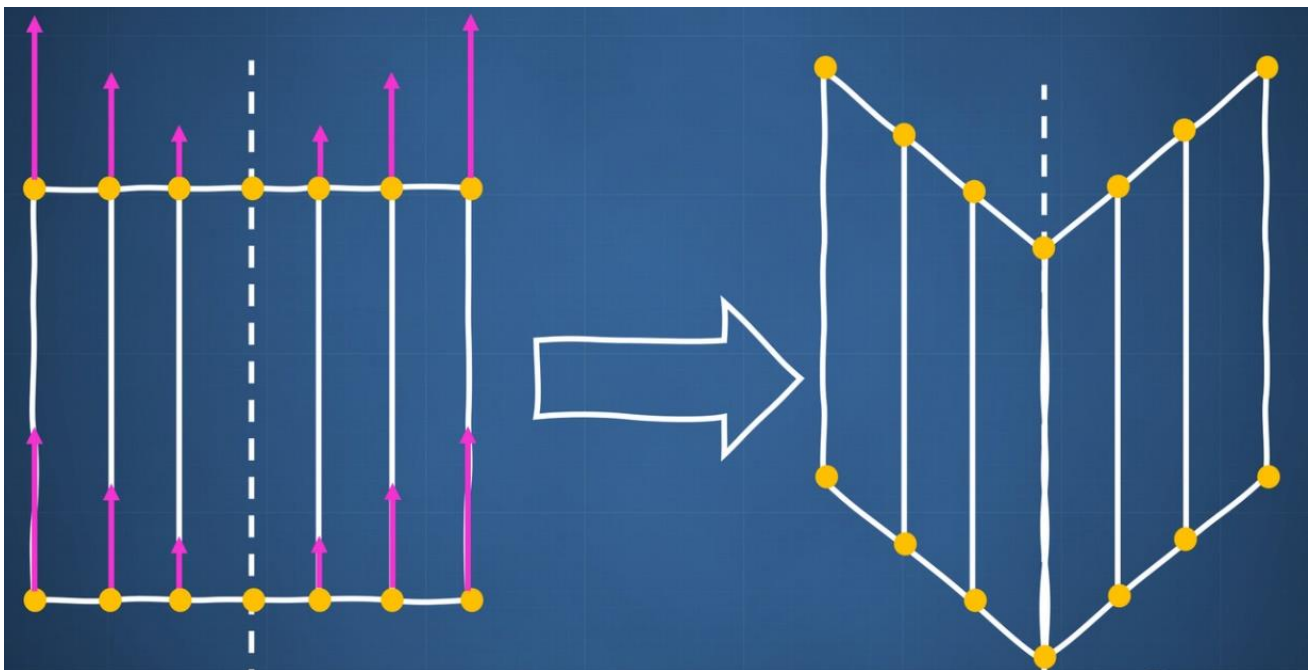


Рисунок 3.9 – Предеформація STL моделі

Потім деформована модель завантажується в слайсер, і генерується звичайний G-код. Цей код gcode деформованої частини потім перетворюється назад, тож відбувається зворотний процес. Тому всі точки gcode знову переміщуються вниз залежно від їх відстані до центральної осі.

На рисунку 3.10 зображено зворотне перетворення g-коду при завантаженні у слайсер.

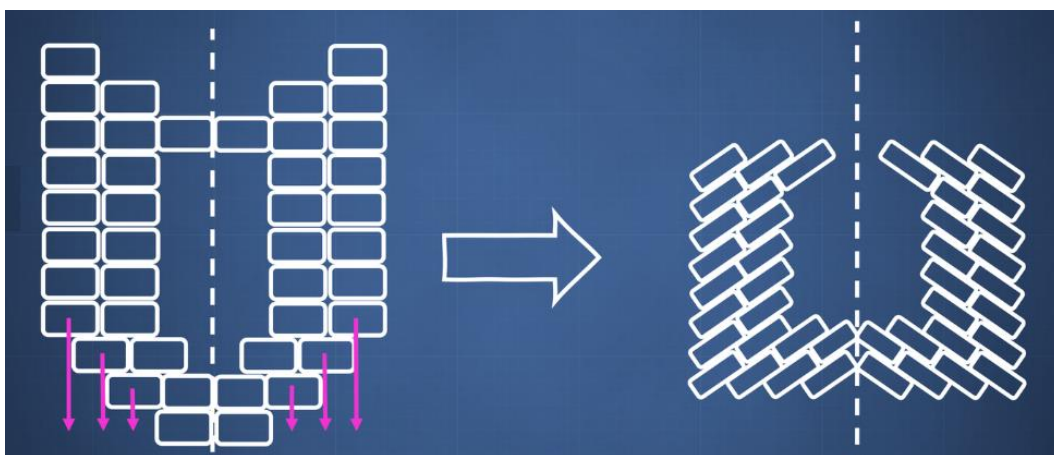


Рисунок 3.10 – Зворотнє перетворення g-коду

Тож для підготовки gcode необхідно виконати алгоритм, наведений на рисунку 3.11.

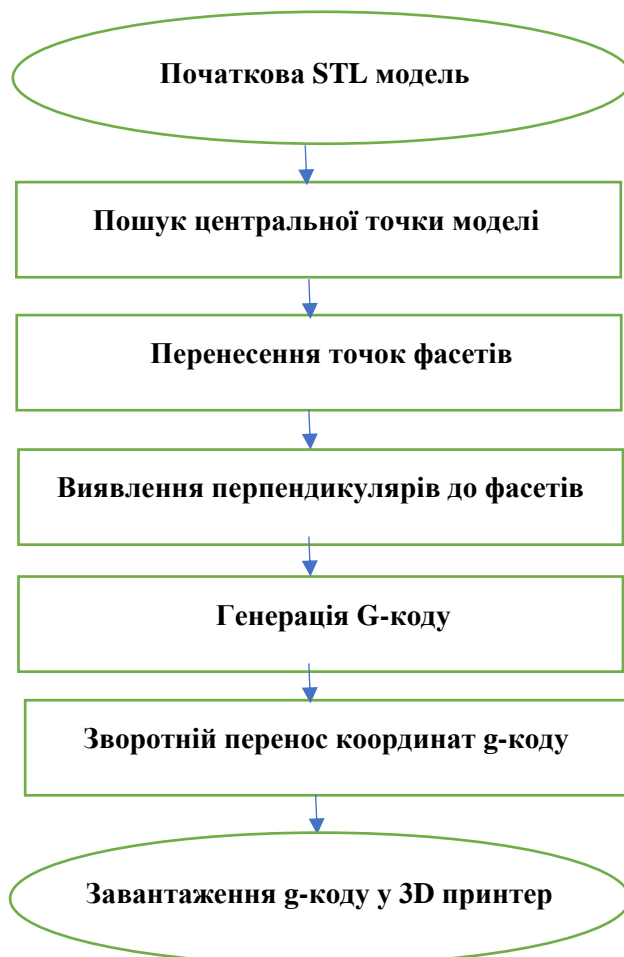


Рисунок 3.11 – Алгоритм перетворення mesh файлу

### 3.3 Математичні методи перетворення mesh файлів

Для того, щоб знайти найвищу точку STL-моделі, необхідно проаналізувати її геометрію, яка складається з набору трикутників, кожен з яких описується трьома вершинами в тривимірному просторі. Вершини зберігаються у вигляді координат  $(x, y, z)$ . Найвища точка моделі буде тією, яка має максимальне значення координати  $z$  (осі висоти) [14].

Основні кроки для знаходження найвищої точки STL-моделі:

- завантажити STL-файл. STL-файл може бути або в ASCII-форматі, або в бінарному форматі. Незалежно від формату, файл містить інформацію про вершини трикутників моделі;

- парсинг (розбір) STL-файлу. Якщо файл у ASCII-форматі, то його можна просто прочитати як текстовий файл і витягти координати кожної вершини. Якщо це бінарний STL-файл, знадобиться спеціальна бібліотека для обробки, наприклад, в Python можна використовувати бібліотеки `numpy-stl` або `trimesh` для зчитування STL-файлу;

- отримати координати вершин. Для кожного трикутника STL моделі зберігаються три вершини, кожна з яких має координати  $(x, y, z)$ . Найвищу точку можна знайти, порівнюючи значення координат  $z$  усіх вершин;

- знайти максимальне значення  $z$ . Всі координати  $z$  зберігаються в масиві або списку, після чого можна знайти максимальне значення за допомогою відповідних функцій, таких як `max()` в Python.

У якості прикладу розглянемо код на Python для знаходження найвищої точки STL-файлу. Для того щоб знайти максимальну координату  $Z$  необхідно застосувати бібліотеку `numpy-stl` для зручної роботи з STL-файлами.

Лістинг коду пошуку максимальної координати  $Z$  STL моделі на Python зображено на рисунку 3.12.

```

from stl import mesh

# Завантажуємо STL файл
model = mesh.Mesh.from_file('model.stl')

# Збираємо всі вершини моделі
vertices = model.vectors.reshape(-1, 3) # Отримуємо всі вершини у форматі (x, y, z)

# Знаходимо вершину з максимальним значенням Z (найвища точка)
max_z = vertices[:, 2].max() # Найвище значення по осі Z
max_vertex = vertices[vertices[:, 2].argmax()] # Координати вершини з максимальним Z

print(f"Найвища точка: {max_vertex}, Z-координата: {max_z}")

```

Рисунок 3.12 – Пошук максимальної координати Z STL моделі на Python

Опис процесу:

- завантаження STL: функція `mesh.Mesh.from_file()` завантажує STL-файл;
- отримання вершин: усі вершини трикутників зберігаються у масиві `model.vectors`. Використовуючи функцію `reshape`, вони перетворюються на одномірний список вершин;
- пошук найвищої точки: функція `max()` знаходить найбільше значення по осі `z`, а `argmax()` повертає індекс вершини з максимальним значенням `z`.

Наступним кроком необхідно створити кінчне перенесення точок STL моделі відносно координат  $(x, y)$  знайденої на попередньому кроці точки фасету з максимальною координатою  $Z$ .

Кінчне перенесення точок STL-моделі є трансформацією, що проектує всі точки моделі на певну площину або лінію, схожу на перспективну проекцію, де точки переміщуються з урахуванням певної фокусної точки (центра конуса). Це тип проекції, який застосовується в різних графічних і технічних додатках, коли об'єкти потрібно спроектувати під певним кутом або на поверхню. Кінчне перенесення або кінчна проекція – це процес, коли всі точки об'єкта проектуються на площину або іншу поверхню через визначену фокусну точку (центр проекції). В геометрії та 3D-графіці цей метод використовується для

симуляції перспективної зміни об'єкта або для перетворення координат моделі в певну систему.

Основні параметри конічного перенесення:

– фокусна точка: це центр конуса, з якого виконуватиметься проекція всіх точок. Це може бути конкретна точка в просторі, наприклад, початок координат  $(0, 0, 0)$  або будь-яка інша задана точка;

– площина проекції: поверхня, на яку будуть проектуватися точки STL-моделі. Зазвичай це площина X–Y, X–Z, або Y–Z, але може бути будь-якою іншою площиною або кривою поверхнею;

– кут або напрямок проекції: напрямок, під яким відбувається перенесення точок. Це визначає, як буде змінюватися масштаб об'єкта залежно від відстані до фокусної точки.

Алгоритм конічного перенесення для STL-моделі:

- завантаження STL-файлу;
- вибір фокусної точки для перенесення (центра конуса);
- обчислення напрямку проекції для кожної точки;
- перенесення точок відповідно до формули проекції.

Найчастіше використовується рівняння перспективної проекції, яке виглядає згідно з формулами (3.1) та (3.2) [15]:

$$x' = \frac{x-x_f}{z-z_f}, \quad (3.1)$$

$$y' = \frac{y-y_f}{z-z_f}, \quad (3.2)$$

де  $(x, y, z)$  – координати початкової точки на поверхні моделі;

$x', y'$  – координати проекції на площині;

$(x_f, y_f, z_f)$  – координати фокусної точки (центра конуса);

$z_f$  – фокусна відстань (глибина проекції).

Конічне перетворення також можливо створити на Python (рисунок 3.13) з використанням бібліотеки `pumpy-stl`, що дозволить завантажити STL-файл і здійснити конічне перенесення всіх точок.

```
import numpy as np
from stl import mesh

# Завантажуємо STL файл
model = mesh.Mesh.from_file('model.stl')

# Визначаємо фокусну точку (центр конічного перенесення)
focus_point = np.array([0.0, 0.0, 100.0]) # Приклад фокусної точки (Xf, Yf, Zf)

# Функція для конічного перенесення точки
def conical_projection(vertex, focus_point):
    x, y, z = vertex
    x_f, y_f, z_f = focus_point

    # Перенесення координат
    x_new = (x - x_f) / (z - z_f)
    y_new = (y - y_f) / (z - z_f)

    # Враховуємо площину, на яку проєктується модель (наприклад, площина X-Y)
    return np.array([x_new, y_new, 0]) # z = 0 для площини X-Y

# Застосовуємо проєкцію до всіх вершин моделі
for i, vertex in enumerate(model.vectors.reshape(-1, 3)):
    model.vectors[i // 3][i % 3] = conical_projection(vertex, focus_point)

# Зберігаємо нову модель після проєкції
model.save('conical_projected_model.stl')
```

Рисунок 3.13 – Конічне перетворення координат STL моделі на Python

Опис процесу:

- завантаження STL: за допомогою функції `mesh.Mesh.from_file()` завантажуються початкова модель;

– фокусна точка: визначається центр конуса, з якого виконується проекція (в прикладі на рисунку 3.13 – точка з координатами (0,0,100);

– функція перенесення: для кожної вершини викликається функція `conical_projection`, яка обчислює нові координати на площині X–Y, використовуючи формули конічного перенесення;

– збереження STL: після перенесення точок модель зберігається у новий STL-файл.

Пошук перпендикулярів до фасетів STL моделі необхідний для визначення положення поворотної осі екструдера  $\alpha$  відносно до самої моделі. Тобто вектор перпендикуляра фасету має знаходитися в одній площині із осью хотенду екструдера. Щоб знайти перпендикуляри (нормалі) до фасетів (граней) STL-моделі, потрібно обчислити нормалі до трикутників, з яких складається поверхня моделі. Кожен трикутник у STL-файлі представлений трьома вершинами, і нормаль до трикутника — це вектор, перпендикулярний до його площини.

У STL-файлі для кожного трикутника вже зберігається інформація про нормаль, але іноді потрібно самостійно обчислити нормалі на основі вершин трикутника, якщо ця інформація відсутня або неточна.

Кроки для обчислення перпендикулярів (нормалей) до граней STL:

- завантаження STL-файлу;
- витягування вершин кожного трикутника;
- обчислення нормалей для кожного трикутника за допомогою векторного добутку;
- нормалізація нормалі (перетворення її на одиничний вектор).

Формула для обчислення нормалі трикутника має наступний вигляд. Якщо трикутник має три вершини з координатами  $A(x_1, y_1, z_1)$ ,  $B(x_2, y_2, z_2)$ ,  $C(x_3, y_3, z_3)$  то нормаль до цього трикутника обчислюється через векторний добуток двох векторів, що лежать на площині трикутника.

Необхідно створити два вектори на площині трикутника за формулами (3.3) та (3.4) [16]:

$$\overrightarrow{AB} = B - A = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1), \quad (3.3)$$

$$\overrightarrow{AC} = C - A = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1). \quad (3.4)$$

Необхідно обчислити добуток векторів  $\overrightarrow{AB}$  та  $\overrightarrow{AC}$  за формулою (3.5):

$$\vec{N} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AC}. \quad (3.5)$$

Вектор  $\vec{N}$  нормаль має координати за формулами (3.6), (3.7) та (3.8):

$$N_x = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1), \quad (3.6)$$

$$N_y = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1), \quad (3.7)$$

$$N_z = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1). \quad (3.8)$$

Формула (3.9) використовується для нормалізації вектора  $\vec{N}$ , тобто зробити його одиничним [17]:

$$\overrightarrow{N_{norm}} = \frac{\vec{N}}{\|\vec{N}\|}, \quad (3.9)$$

де  $\|\vec{N}\|$  – це довжина (модуль) вектору  $\vec{N}$ , яку можна обчислити за формулою (3.10):

$$\|\vec{N}\| = \sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}. \quad (3.10)$$

Для знайдення нормалей на Python (рисунок 3.13) необхідно використати бібліотеку `numpy-stl`, яка дозволяє зручно працювати з STL-файлами [18].

```

import numpy as np
from stl import mesh

# Завантажуємо STL файл
model = mesh.Mesh.from_file('model.stl')

# Функція для обчислення нормалі до трикутника
def calculate_normal(v1, v2, v3):
    # Створюємо вектори на площині трикутника
    vector1 = v2 - v1
    vector2 = v3 - v1

    # Обчислюємо векторний добуток (нормаль)
    normal = np.cross(vector1, vector2)

    # Нормалізація вектора (перетворення на одиничний вектор)
    normal_length = np.linalg.norm(normal)
    if normal_length == 0:
        return normal # В разі, якщо вектор має довжину 0 (дегенеративний трикутник)
    return normal / normal_length

# Проходимо по всіх трикутниках і обчислюємо нормалі
normals = []
for i, triangle in enumerate(model.vectors):
    v1, v2, v3 = triangle
    normal = calculate_normal(v1, v2, v3)
    normals.append(normal)

# Виведемо нормалі для кожного трикутника
print(f"Трикутник {i+1}: Нормаль {normal}")

```

Рисунок 3.13 – Знайдення нормалей до фасетів STL моделі на Python

### 3.4 Висновки до третього розділу

А даному розділі проведено аналіз найпоширеніших у виробництві mesh файлів, в результаті якого для подальшої розробки обрано формат STL. Запропоновано алгоритм перетворення STL файлу для друку на принтері, що

розроблено, без підтримок. Запропоновано математичні методи виконання основних задач алгоритму та наведено приклади їх автоматизації на Python.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КРОКОВОГО ДВИГУНА ОСІ $\theta$

### 4.1 Розробка моделі крокового двигуна осі $\theta$

Через те що навантаження на кроковий двигун осі  $\theta$  є найбільшим, необхідно провести моделювання його роботи.

Кроковий електродвигун - це синхронний безщітковий електродвигун з кількома обмотками, в якому струм, що подається в одну з обмоток статора, що викликає фіксацію ротора. Послідовна активація обмоток двигуна викликає дискретні кутові переміщення (кроки) ротора.

Система управління ним була зібрана за принципом реального управління кроковому режимі з програмним зворотним зв'язком. З бібліотеки програми було взято готову модель біполярного крокового двигуна. На рисунку 4.1 представлена схема у загальному вигляді.

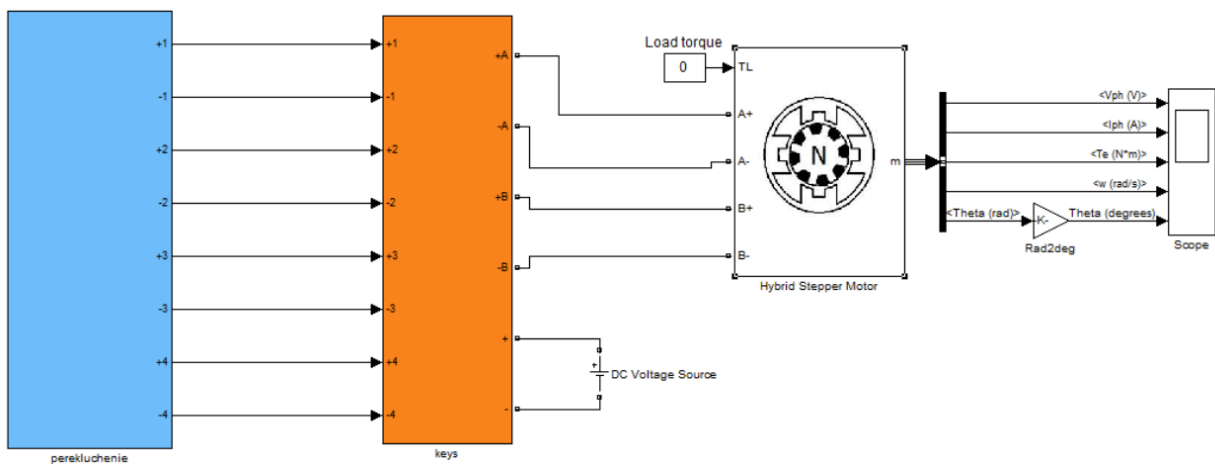


Рисунок 4.1 – Схема крокового двигуна осі  $\theta$  у загальному вигляді

У програмі є можливість зміни параметрів крокового двигуна Інтерфейс занесення параметрів зображено рисунку 4.2

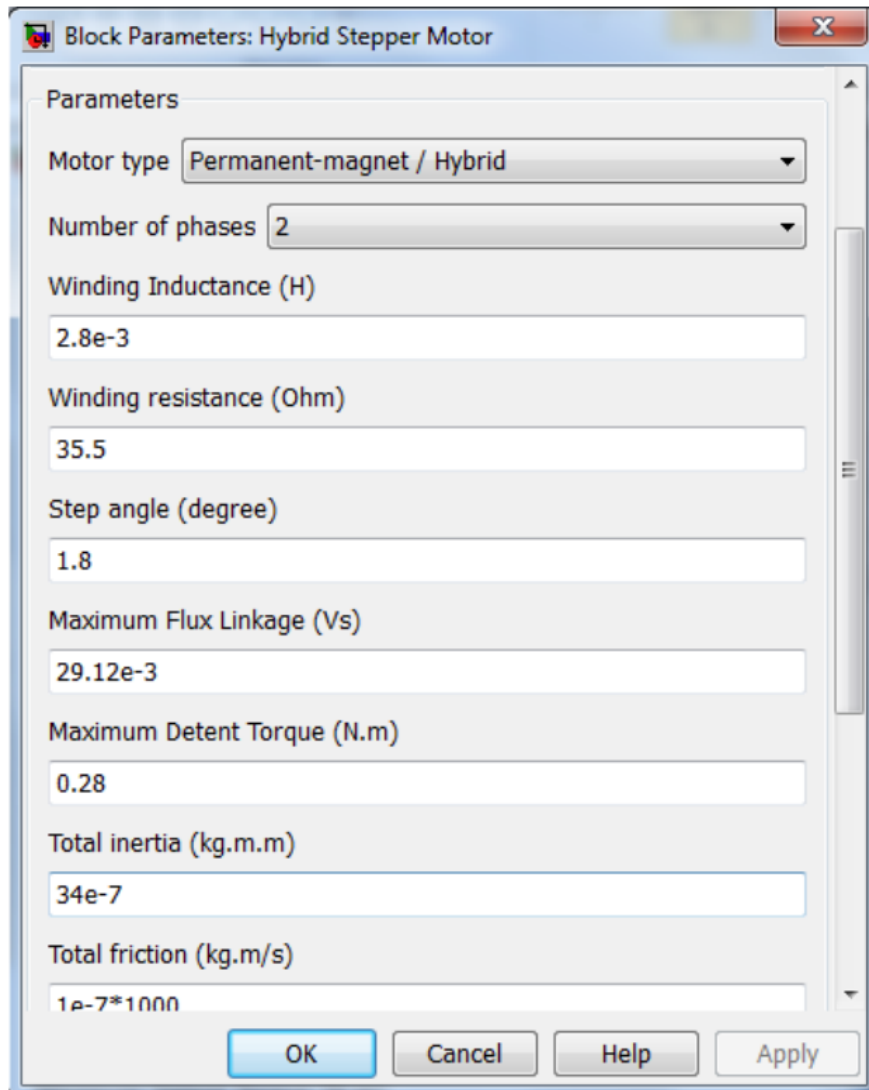


Рисунок 4.2 – Інтерфейс введення параметрів двигуна

Для моделювання було обрано двигун типорозміру NEMA 17 марки 17HS 3401, так як саме він застосовується у 3D принтері.

Параметри взяті зі списку нижче, проте бачимо, що опір фази двигуна і параметр (рисунок 4.2) не збігаються:

1. Крок кута –  $1,8 \pm 5\%$ ;
2. Номінальний струм – 1,3 А;
3. Число фаз – 2;
4. Опір фази – 2,4 Ом;
5. Індуктивність фази – 2,8 мГн;

6. Момент інерції – 34 г x см<sup>2</sup>;
7. Момент утримання – 2,8 кг x см;
8. Крутний момент – 1,6 Н x см.

Необхідно розрахувати основні параметри двигуна за формулами (4.1) та (4.2):

$$P = I^2 \cdot R = 1,3^2 \cdot 2,4 = 4,056 \text{ Вт}, \quad (4.1)$$

$$I = \frac{P}{U} = \frac{4,056}{12} = 0,338 \text{ А}. \quad (4.2)$$

Це обґрунтовано тим, що у реальній схемі існує реостат – додаткове опір, необхідне регулювання струму. У цьому випадку потрібно вводити опір, порахований за формулою (4.3):

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,338} = 35,5 \text{ Ом}. \quad (4.3)$$

Програма перемикання ключів знаходиться в блоці «perekluchenie», самі ключі знаходяться у блоці "keys".

На рисунку 4.3 зображено схему першого блоку. У цій частині створюються 4 імпульси, які у часі йдуть один за одним, але по чотирьох різних каналів (рисунок 4.4), а потім вони подаються на відповідні ключі.

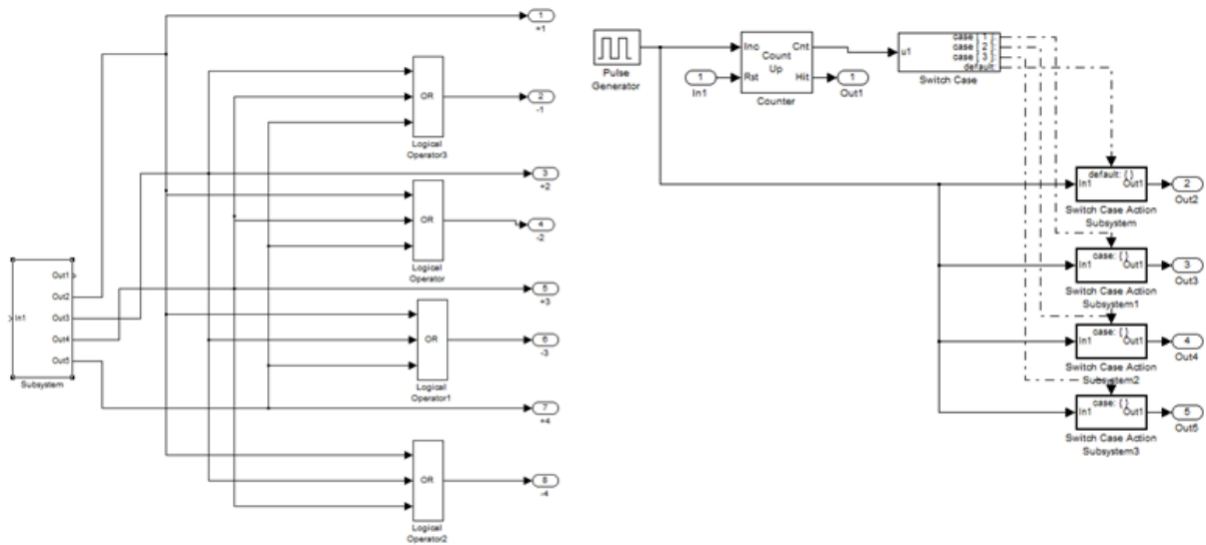


Рисунок 4.3 – Алгоритм перемикання ключів

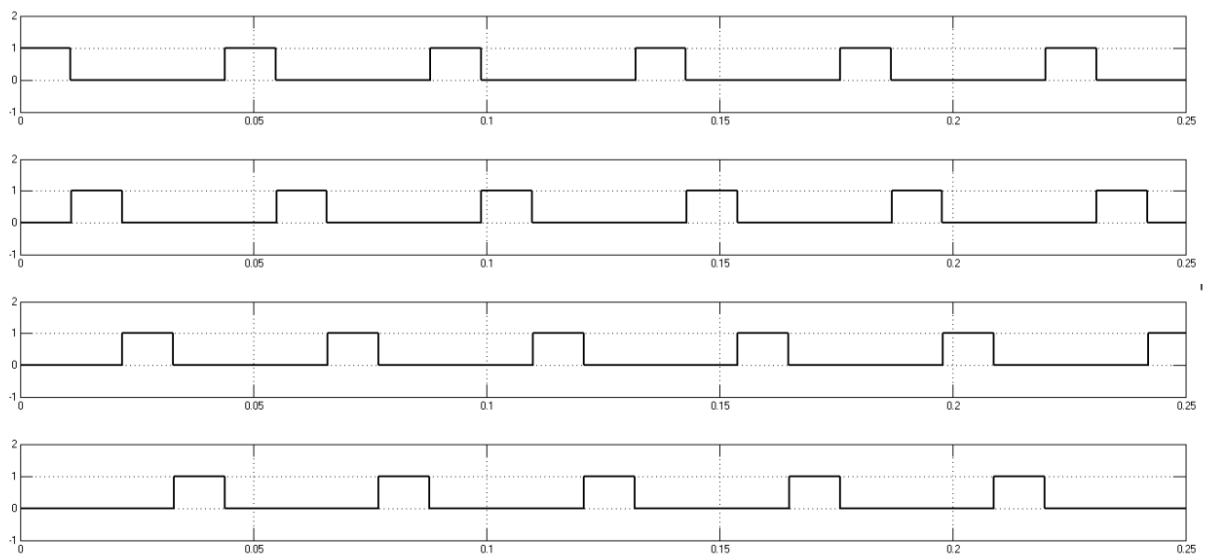


Рисунок 4.4 – Імпульси перемикання ключів

На рисунку 4.5 зображена схема другого блоку. Є 8 ключів – 4 з них підключені до плюсу, решта 4 до мінуса. Ключі з'єднані попарно: плюсовий з мінусовим та підключені до чотирьох виводів двигуна. Дана система працює за принципом: в один момент часу до живлення підключено тільки одна обмотка двигуна в одному із двох можливих напрямків.

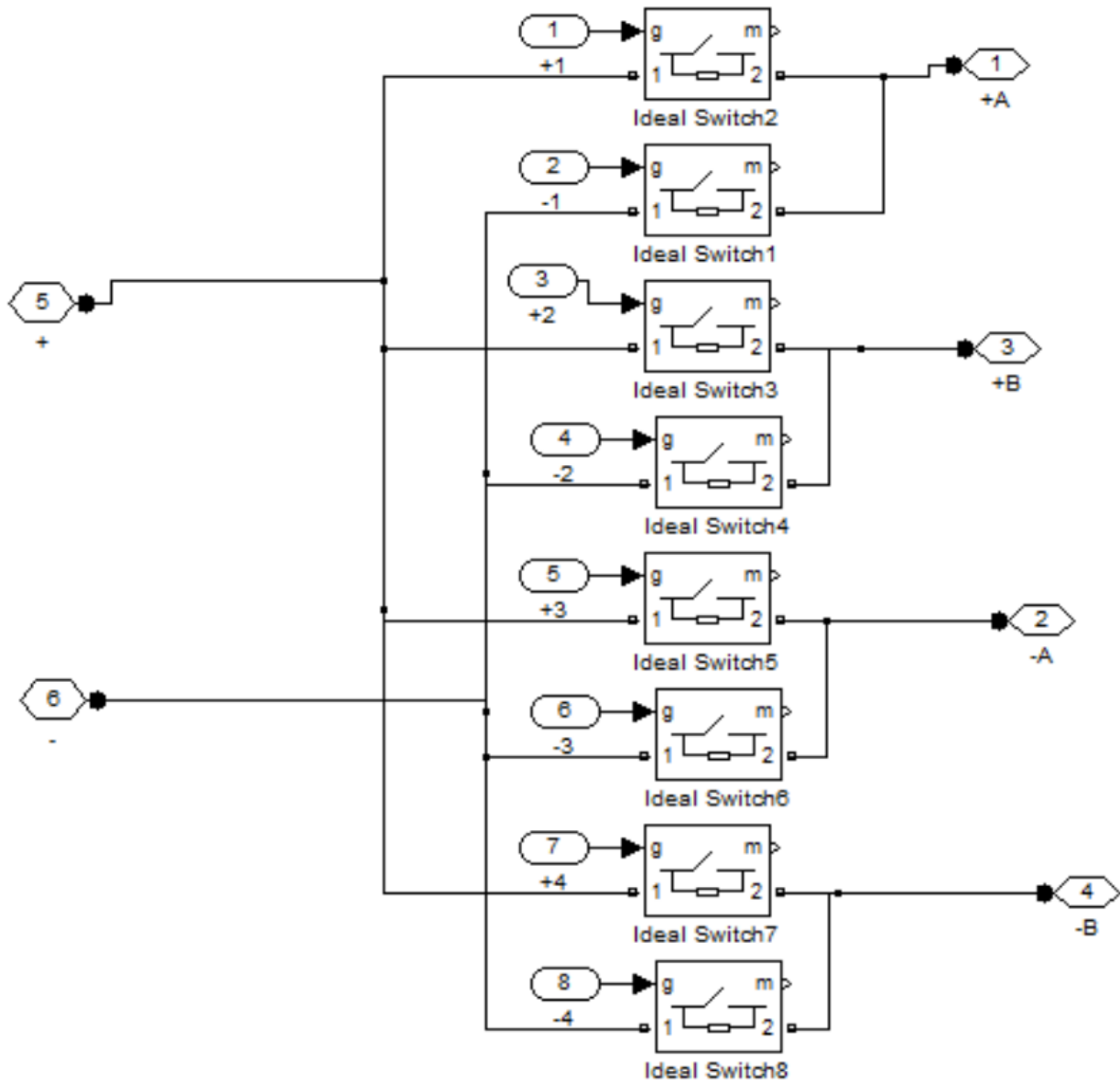


Рисунок 4.5 – Схема підключення ключів

Результати моделювання представлені рисунках 4.6 та 4.7. На графіку зображено зміни п'яти параметрів: напруга живлення, струм обмоток, момент навантаження, швидкість повороту, кут повороту. З графіків видно, що при подачі напруги струм в обмотках наростає без перерегулювання, швидкість і момент мають провал, який виникає через слабе поле в місці між двома

обмотками, також при даній частоті перемикаць обмоток не відбувається випадання із синхронізму, що забезпечує відпрацювання всіх кроків.

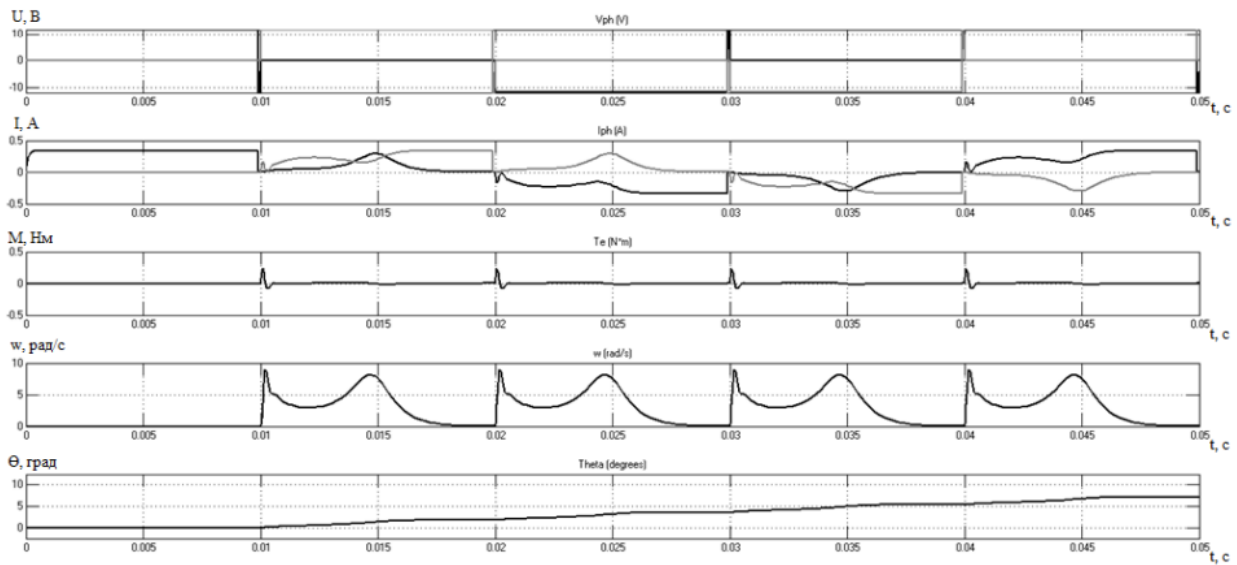


Рисунок 4.6 – Графік зміни параметрів двигуна під час обертання без навантаження

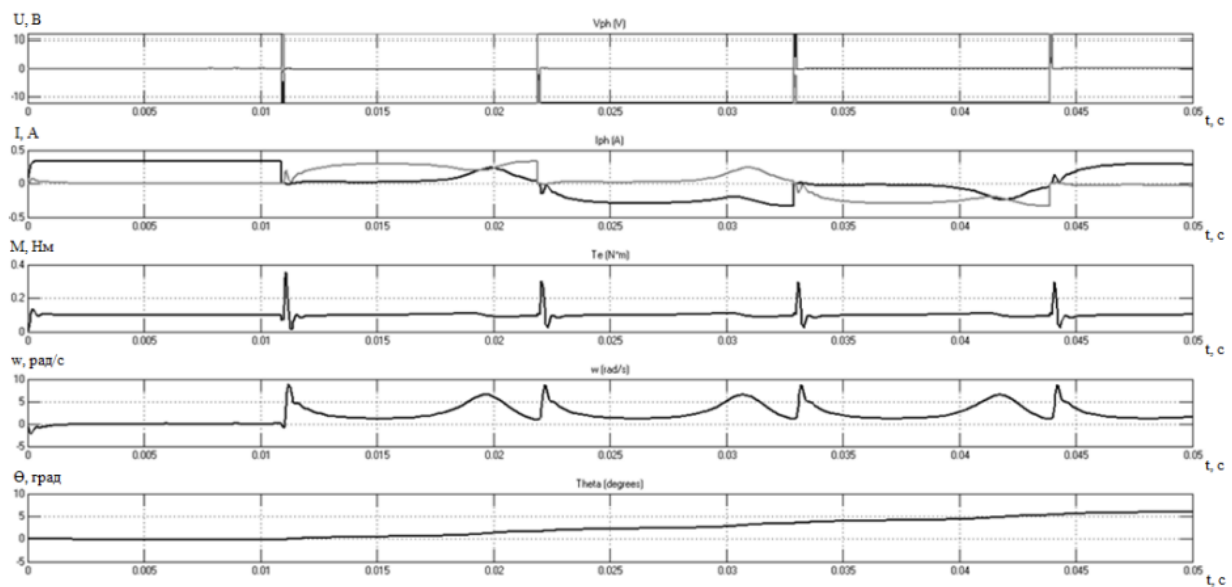


Рисунок 4.7 – Графік зміни параметрів двигуна під час обертання із навантаженням

Таким чином запропонована система дозволяє зменшити вплив навантаження, що утворюється віссю  $\theta$  на кроковий двигун, що її обертає.

## 4.2 Охорона праці

Охорона праці в адитивному виробництві є важливим аспектом для забезпечення безпеки працівників та ефективного функціонування виробничих процесів. Адитивне виробництво, відоме також як 3D-друк, включає використання різних технологій для створення тривимірних об'єктів через додавання шарів матеріалу. Однак цей процес має свої ризики, пов'язані з небезпечними речовинами, високими температурами, електричними загрозами та іншими факторами.

Основні види небезпек в адитивному виробництві:

а) небезпека, пов'язана з хімічними речовинами. Адитивне виробництво часто використовує полімерні порошки, рідкі смоли, металеві порошки та інші матеріали, які можуть бути токсичними або шкідливими для здоров'я при вдиханні чи контакті з шкірою. Наприклад, використання порошкових матеріалів, таких як нейлон або металеві сплави, може викликати подразнення шкіри або дихальних шляхів. Такі матеріали можуть бути канцерогенними або викликати алергічні реакції. Важливо забезпечувати працівників засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), такими як респіратори, рукавички, захисні окуляри;

б) небезпека, пов'язана з лазерним випромінюванням. Багато систем адитивного виробництва використовують лазери для сплавлення порошкових матеріалів або затвердіння полімерних смол. Лазерне випромінювання може бути небезпечним для зору і шкіри, якщо працівники не дотримуються заходів безпеки. Лазерний промінь високої інтенсивності здатний пошкодити сітківку ока або спричинити опіки шкіри. Тому в роботі з такими системами необхідно використовувати спеціальні лазерні окуляри та інші засоби захисту;

в) високі температури. Під час процесу друку можуть виникати високі температури, особливо при роботі з металами або термопластиками. Металеві деталі після друку залишаються розпеченими і можуть спричинити опіки при контакті. Для уникнення таких ситуацій необхідно використовувати тепловідбивні рукавички та інші захисні засоби, а також дотримуватися правил охолодження деталей перед їхнім транспортуванням;

г) пожежна безпека. Одним з найважливіших аспектів охорони праці в адитивному виробництві є забезпечення пожежної безпеки. Використання горючих матеріалів, таких як порошки металів або полімери, може створювати серйозні ризики займання. Наприклад, алюмінієвий або титановий порошок дуже легко запалюється при контакті з відкритим полум'ям або електричними іскрами. Для попередження пожеж необхідно:

- 1) використовувати антистатичне обладнання для зменшення ризику іскор;
- 2) забезпечувати наявність систем пожежогасіння та спеціальних вогнегасників, таких як порошкові або газові системи;
- 3) проводити регулярні перевірки вентиляційних систем для уникнення накопичення пилу, який також може бути вибухонебезпечним.

д) ергономічні ризики та травматизм. Окрім хімічних і фізичних небезпек, існують також ергономічні фактори ризику. Деякі деталі, виготовлені в процесі адитивного виробництва, можуть бути важкими або мати незручну форму, що створює додаткові навантаження на працівників під час їхнього переміщення або монтажу. Це може призвести до розтягнень, травм м'язів і суглобів. Для запобігання таким травмам необхідно:

- 1) використовувати механічні пристрої для підйому важких об'єктів;
- 2) забезпечувати робочі місця регульованими стільцями, що дозволяють працівникам змінювати положення тіла під час роботи.

е) вентиляція та контроль повітря. Приміщеннях, де здійснюється адитивне виробництво, повинна бути забезпечена ефективна вентиляція. При використанні порошків або рідких матеріалів виділяються шкідливі частинки,

пари або газу, які можуть накопичуватися в повітрі і призводити до погіршення здоров'я працівників. Системи вентиляції повинні бути здатні очищати повітря і запобігати накопиченню небезпечних речовин. Крім того, на робочих місцях необхідно проводити регулярний моніторинг повітря для оцінки концентрацій шкідливих речовин і своєчасного реагування на перевищення норм;

є) охорона праці та законодавство. У країнах з розвиненою промисловістю охорона праці в адитивному виробництві регулюється на законодавчому рівні. Наприклад, в Європейському Союзі діють стандарти безпеки, які вимагають від роботодавців забезпечувати відповідне навчання працівників, постачати їх ЗІЗ і проводити регулярні інструктажі. Окрім того, роботодавці зобов'язані проводити оцінку ризиків і вживати заходів для їхнього зменшення;

ж) навчання та інструктажі з охорони праці. Навчання працівників є важливою складовою системи охорони праці. У контексті адитивного виробництва необхідно розробити спеціальні програми, що включають:

- 1) інструктажі з використання обладнання;
- 2) ознайомлення з небезпеками, які виникають під час роботи з хімічними матеріалами або лазерними системами;
- 3) навчання з реагування на надзвичайні ситуації, такі як пожежі або хімічні викиди;
- 4) регулярне проведення таких заходів допомагає підвищити рівень обізнаності працівників і зменшити ризики нещасних випадків.

з) засоби індивідуального захисту (ЗІЗ). Засоби індивідуального захисту є ключовим елементом захисту працівників. До основних ЗІЗ в адитивному виробництві належать:

- 1) респіратори – для захисту від вдихання пилу та хімічних парів;
- 2) окуляри – для захисту очей від лазерного випромінювання та часток матеріалів;
- 3) рукавички – для захисту рук від хімічних речовин, порізів або опіків;

4) спеціальний одяг – для захисту від високих температур та хімічних опіків.

Охорона праці в адитивному виробництві потребує комплексного підходу, що включає дотримання стандартів безпеки, використання ЗІЗ, організацію навчання працівників та забезпечення відповідних норм праці.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи магістра отримані наступні результати:

- проведено аналіз методів утворення технологічних підтримок у FFF/FDM 3D друці, а також методи, технології та конструкційні рішення друку без підтримок;

- в результаті проведеного аналізу запропоновано конструкцію полярного 3D принтера, що працює в циліндричній системі координат, з додатковою поворотною віссю екструдера. Сам екструдер розташовується під кутом  $45^\circ$  до столу. Таке конструкційне рішення дозволить забезпечити друк без підтримок;

- у Autodesk Fusion розроблено повну 3D модель конструкції 3D принтера, описано основні конструкційні вузли, їх компоненти та принцип функціонування: корпус, ось Z, ось R, ось  $\theta$ , ось  $\alpha$ . Наведено ескізи, зовнішній вигляд та технологію виготовлення нестандартних компонентів;

- проаналізовано структуру mesh файлів, що використовуються у 3D друці. У роботі наведено структуру найпоширенішого формату STL;

- запропоновано алгоритм створення G-коду для принтера, що розроблено, з використанням стандартних САМ-систем «слайсерів» на прикладі Ultimaker Cura;

- запропоновано математичну модель для кінчного перетворення STL формату з урахуванням осі  $\alpha$  розробленого 3D принтера для подальшої генерації G-коду у Ultimaker Cura. За результатами розробки математичної моделі створено програму для автоматичної зміни STL формату на мові програмування Python;

- розглянуто питання охорони праці в адитивному виробництві;

- розроблено полярний 3D принтер з можливістю друку без технологічних підтримок демонструє високу ефективність та інноваційний підхід до виробничих процесів. Отримані результати роботи також можна віднести до Цілі

сталого розвитку 12 – "Відповідальне споживання та виробництво", зокрема п. 12.4: "Зменшити обсяг утворення відходів". Використання такого принтера знижує вартість виробництва, усуває необхідність переробки відходів і сприяє збільшенню їх повторного використання на основі сучасних технологій та рішень. Це сприяє створенню більш екологічно відповідальних виробничих процесів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології, освітньо–професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно–інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.

2. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП “УкрНДНЦ”. 2016. 30 с. 3. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології»: довід. / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова. Київ, 2018. 320 с.

3. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології»: довід. / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова. Київ, 2018. 320 с.

4. Кальченко А.С. Переваги та недоліки 3D–принтерів з полярною кінематикою/ Automation and Development of Electronic Devices, Харків. 2023. №1. с. 56–60.

5. Yang Xu, Ziqi Wang, Siyu Gong, Yong Chen Reusable support for additive manufacturing. Additive Manufacturing 2021. Vol. 39.

6. Офіційний сайт AMFG – Autonomous Manufacturing // Сайт AMFG – Autonomous Manufacturing. URL.: <https://amfg.ai/2018/10/17/3d-printing-support-structures-guide/> (дата звернення 20.10.2023).

7. Printables // Сайт Arc Overhang Testprints. URL.: <https://www.printables.com/model/336784-arc-overhang-testprints> (дата звернення 25.10.2023).
8. CNCKitchen // Сайт The RotBot: 4-Axis Non-Planar 3D Printing. URL.: <https://www.cnckitchen.com/blog/the-rotbot-4-axis-non-planar-3d-printing>. (дата звернення 25.10.2023).
9. C. S. Jog. Continuum Mechanics Foundations and Applications of Mechanics. Volume 1, 3rd edition. Indian Institute of Science, Bangalore. Cambridge University Press. 2015. p. 358.
10. Fusion 360 // Сайт Autodesk. URL.: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (дата звернення 25.12.2023).
12. Кальченко А.С. Розробка полярного 3D принтеру з можливістю друку без технологічних підтримок/ Automation and Development of Electronic Devices, Харків. 2024. №2. с. 6–11.
13. Офіційний сайт 3DSystems // Сайт What Is An STL File. URL.: <https://www.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file> (дата звернення 22.05.2024).
14. LeadTools // Сайт File Formats: STereoLithography (STL). URL.: <https://www.leadtools.com/help/sdk/main/api/file-formats-stereolithography-stl.html> (дата звернення 22.05.2024).
15. Geometry of Conics (Mathematical World) / A. V. Akopyan, A. A. Zaslavsky. Mathematical World. 2019. p. 134.
16. Vagn L.H. Shadows Of The Circle: Conic Sections, Optimal Figures And Non-Euclidean Geometry. Wpsc. 2022. p. 120.
17. W.H. Besant Conic Sections (Treated Geometrically): Classic Goemetry Book. Kindle Edition. BNXT. 2020. p. 345.
18. Офіційний сайт Python // Сайт Python. URL.: <https://www.python.org/> (дата звернення 20.06.2024).

19. Офіційний сайт Python // Сайт Python STL dev documentation. URL.:  
<https://python-stl.readthedocs.io/en/latest/> (дата звернення 22.06.2024).