

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра конструювання машин**

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено

Завідувач кафедри

Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**  
**за освітньо-професійною програмою**  
**«Конструювання та дизайн машин»**  
**зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»**

на тему Розширення технологічних можливостей 3D принтера за рахунок додаткових керованих осей

Виконав (-ла): студент \_\_\_\_\_  
(-ка) \_\_\_\_\_  
II курсу, групи МК – 31 мп

Балаєв Руслан Ровшанович

(прізвище ім'я по батькові)

(підпис)

Науковий керівник Професор, д.т.н. Саленко О. Ф.

(посада, науковий ступінь тачене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з розділу \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь тачене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент:

\_\_\_\_\_  
(посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

**Національний технічний університет України**  
**“Київський політехнічний інститут**  
**імені Ігоря Сікорського”**  
**Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра конструювання машин**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Конструювання та дизайн машин»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

\_\_\_\_\_ Балаєв Руслан Ровшанович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Розширення технологічних можливостей 3D принтера за рахунок додаткових керованих осей

науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ Професор, д.т.н. Саленко О. Ф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від **“03” листопада 2023 року № 5127-с**

2. Термін подання студентом дисертації

3. Об'єкт дослідження

4. Предмет дослідження (Вихідні дані)

---

---

---

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

---

---

---

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

---

---

---

---

7. Орієнтовний перелік публікацій

---

---

8. Консультанти розділів дисертації

| Розділ | Прізвище,<br>ініціали та посада<br>консультанта | Підпис, дата      |                     |
|--------|---|-------------------|---------------------|
|        |   | Завдання<br>видав | Завдання<br>отримав |
|        |   |                   |                     |

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| /п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Строк виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|----|---|---|----------|
|    |   |   |          |
|    |   |   |          |
|    |   |   |          |
|    |   |   |          |
|    |   |   |          |
|    |   |   |          |
|    |   |   |          |
|    |   |   |          |
|    |   |   |          |

Студент

Балаєв Руслан Ровшанович

Науковий керівник дисертації

Професор, д.т.н.  
Саленко О. Ф.

## АНОТАЦІЯ

У даній магістерській дисертації розглядається проблема розширення технологічних можливостей 3D-принтерів шляхом впровадження додаткових керованих осей. Основною метою роботи є розробка поворотної платформи для 3D-принтера Ender 3, яка дозволить покращити точність друку та розширити функціональні можливості існуючих моделей принтерів. В рамках роботи було виконано детальний аналіз існуючих технологій 3D-друку, зокрема FDM-технології, а також вивчено недоліки стандартних 3D-принтерів і можливості їх вдосконалення. Розроблено конструкцію поворотної платформи з двома додатковими осями, а також проведено динамічний аналіз обертання каретки та оцінку напружень у деталях конструкції. У результаті розрахунків було підтверджено, що максимальні деформації не перевищують допустимих меж. Також було розглянуто стартап-проект, спрямований на продаж комплекту для модернізації принтерів, включаючи необхідні деталі та програмне забезпечення. Оцінка фінансових витрат і виробничих можливостей показала високий потенціал проекту на ринку 3D-друку.

### Ключові слова

3d-друк; fdm-технологія; додаткові керовані осі; поворотна платформа; 3d-принтер; модернізація принтера; технічне проектування; стартап

## **ABSTRACT**

This master's thesis addresses the issue of expanding the technological capabilities of 3D printers by implementing additional controlled axes. The main objective of the work is to develop a rotary platform for the Ender 3 3D printer, which will improve printing accuracy and expand the functionality of existing printer models. The work includes a detailed analysis of existing 3D printing technologies, particularly FDM technology, and an examination of the limitations of standard 3D printers and their potential improvements. A design for a rotary platform with two additional axes was developed, and dynamic analysis of the carriage rotation and stress evaluation of the components was performed. The calculations confirmed that the maximum deformations do not exceed the acceptable limits. Additionally, a startup project aimed at selling a kit for printer upgrades, including necessary parts and software, was reviewed. The financial cost and production capabilities assessment showed the high market potential of the project in the 3D printing industry.

### **Keywords**

3D printing, FDM technology, additional controlled axes, rotary platform, 3D printer, printer upgrade, Ender 3, technical design, startup

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 8  |
| 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ .....   | 9  |
| 1.1 Огляд основних технологій 3D-друку .....   | 9  |
| 1.2 Технологія FDM: принцип роботи та сфера застосування .....                                 | 13 |
| 1.3 Аналіз недоліків існуючих моделей FDM-принтерів.....                                       | 16 |
| 1.4 Можливі рішення для покращення FDM-технології.....   | 18 |
| 1.5 Огляд існуючих способів впровадження додаткових керованих осей.....                        | 21 |
| 2. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ FDM 3D-ПРИНТЕРІВ .....                                      | 23 |
| 2.1 Рама та корпус .....   | 23 |
| 2.2 Система руху по осях X, Y, Z .....   | 25 |
| 2.3 Екструдер .....  | 34 |
| 2.4 Електроніка та система управління.....   | 45 |
| 2.5 Вибір основних конструктивних елементів для 5-осьового принтера.....                       | 51 |
| 3. ПРОЕКТУВАННЯ ПЛАТФОРМИ З ДОДАТКОВИМИ КЕРОВАНИМИ<br>ОСЯМИ .....                              | 63 |
| 3.1 Проектування основних деталей поворотної платформи в середовищі<br>Autodesk Inventor ..... | 63 |
| 3.2 Проектування збірки поворотної платформи.....  | 68 |
| 3.3 Розробка робочих креслень деталей .....  | 71 |
| 3.4 Розрахунки поворотної платформи .....  | 76 |
| 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ .....  | 79 |
| 4.1 Ідея та унікальність стартапу .....  | 79 |
| 4.2 Цільова аудиторія та ринкові перспективи .....   | 82 |
| 4.3 SWOT-аналіз проєкту .....  | 83 |
| 4.4 Вирішення слабких сторін проєкту .....   | 85 |
| 4.5 Оцінка фінансових та виробничих витрат .....   | 87 |
| ВИСНОВКИ.....  | 89 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....  | 90 |

## ВСТУП

3D-друк є однією з найбільш революційних технологій останніх десятиліть, яка змінює підходи до виробництва, проектування та виготовлення різноманітних виробів у найрізноманітніших галузях. Завдяки своїй універсальності та доступності, технологія 3D-друку швидко здобула популярність у багатьох сферах, таких як медична індустрія, машинобудування, архітектура, освіта, а також у хобі та побутовому використанні. Найбільш популярними є FDM (Fused Deposition Modeling) принтери, які дозволяють створювати деталі різної складності з пластикових матеріалів.

Однак існуючі FDM-принтери мають певні обмеження, зокрема, у точності друку та можливостях виготовлення складних геометричних форм. Ці обмеження пов'язані з відсутністю додаткових керованих осей, що ускладнює створення моделей з більш складними або високоточними деталями. Одним із найбільш перспективних напрямків розвитку є вдосконалення принтерів за рахунок додавання додаткових осей, що дозволяє значно розширити функціональність та точність друку.

Метою даної роботи є розробка поворотної платформи з додатковими керованими осями для 3D-принтера Ender 3, що дозволить розширити технологічні можливості принтера, покращити точність друку та зменшити обмеження стандартних моделей. У рамках роботи було здійснено аналіз існуючих технологій 3D-друку, розглянуто можливості модернізації конструкції 3D-принтера, а також розроблено стартап-проект, спрямований на створення комплексу для модернізації принтерів.

Робота складається з кількох розділів, у яких розглядаються теоретичні та практичні аспекти впровадження додаткових осей у конструкцію 3D-принтера, а також економічні та виробничі розрахунки, що дозволяють оцінити потенціал цього проекту на ринку. Крім того, у роботі здійснено розробку технічних креслень та розрахунків для виготовлення необхідних компонентів, а також проведено аналіз фінансових витрат і ринкових перспектив реалізації проекту.

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ

## 1.1 Огляд основних технологій 3D-друку

3D-друк, або адитивне виробництво, є інноваційною технологією, яка використовує цифрові 3D-моделі для побудови фізичних об'єктів шляхом додавання матеріалу шар за шаром. Сучасний 3D-друк дозволяє використовувати різноманітні матеріали, включаючи пластик, металеві порошки, рідкі полімери та інші матеріали. Основні технології 3D-друку включають:

**Fused Deposition Modeling (FDM)** — це одна з найбільш поширених технологій 3D-друку, яка реалізує виготовлення об'єктів пошарово шляхом екструзії нагрітого термопластичного матеріалу через сопло. Цей процес дозволяє створювати як прості, так і складні геометрії, включаючи корпуси, прототипи та функціональні елементи для таких галузей, як автомобілебудування та аерокосмічна промисловість. Завдяки широкому вибору матеріалів, таких як PLA, ABS, нейлон та TPU, FDM-друк забезпечує гнучкість і високу функціональність у виробництві прототипів та невеликих серій деталей.



Рис. 1.1 – Зображення процесу FDM 3D-друку [1]

Особливістю FDM є потреба у підтримуючих структурах для друку нависних елементів, які додаються під час друку і видаляються в процесі постобробки. Хоча поверхня деталей, створених за цією технологією, зазвичай має шорсткість, існують методи покращення естетичних характеристик, включаючи шліфування, фарбування чи металізацію. FDM вирізняється

швидким виготовленням прототипів, доступністю обладнання та матеріалів, що робить її популярним вибором для швидкого розроблення виробів.[1]

**Stereolithography (SLA)** — це технологія 3D-друку, яка використовує фотополімери та ультрафіолетове (UV) світло для створення тривимірних об'єктів. Процес починається з цифрової 3D-моделі, яка розбивається на шари. Кожен шар фотополімеру послідовно затверджується UV-променем, після чого додається наступний шар, утворюючи цілісний об'єкт. Ця технологія дозволяє досягти високої точності (до 25 мікрон) та гладкості поверхні, що робить SLA ідеальною для складних моделей, ювелірних виробів, медичних пристроїв та архітектурних макетів

SLA-друк забезпечує значно кращу якість поверхні порівняно з FDM, однак має свої обмеження. Матеріали, що використовуються, зазвичай дорожчі і менш міцні, що робить їх непридатними для деталей, які зазнають значних механічних навантажень. Крім того, SLA-принтери зазвичай мають менший робочий об'єм, що обмежує їх у використанні для великих об'єктів або серійного виробництва. Попри це, SLA широко застосовується для створення презентаційних моделей, косметичних прототипів та інших високоточних конструкцій. [2]

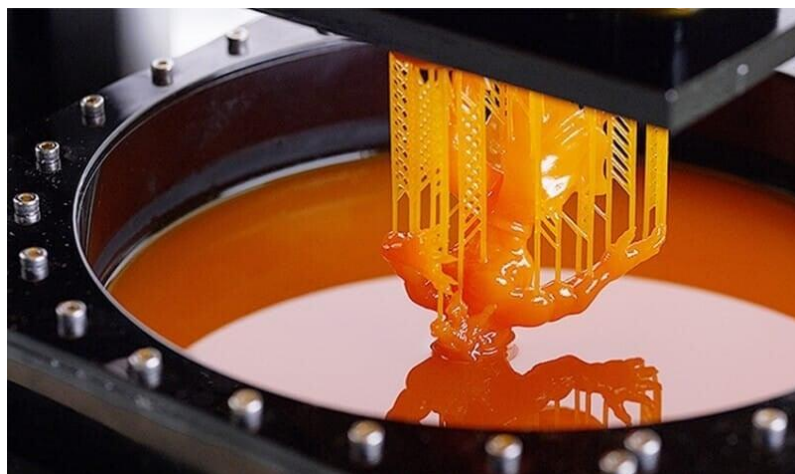


Рис. 1.2 – Зображення процесу SLA 3D-друку [2]

**Selective Laser Sintering (SLS)** — це технологія 3D-друку, яка використовує лазер для селективного спікання дрібних частинок порошкового матеріалу, таких як поліамід (Nylon 12). Лазер плавить частинки в точках, що

відповідають перерізам цифрової 3D-моделі, створюючи шари один за одним. Неплавлений порошок оточує модель, забезпечуючи природну підтримку без необхідності у додаткових структурах. Цей метод ідеально підходить для створення складних геометрій, таких як решітчасті структури, які неможливо виготовити традиційними методами виробництва.

SLS-друк вирізняється високою точністю та однорідними механічними властивостями деталей, незалежно від їхньої орієнтації в друці. Після друку деталі можуть проходити постобробку, наприклад, полірування або фарбування. Основним матеріалом є Nylon 12, який має чудову термічну стабільність і міцність, що робить SLS придатним для функціональних прототипів і масового виробництва. Однак технологія має обмеження через високу вартість обладнання та необхідність складного процесу видалення залишкового порошку.[3]

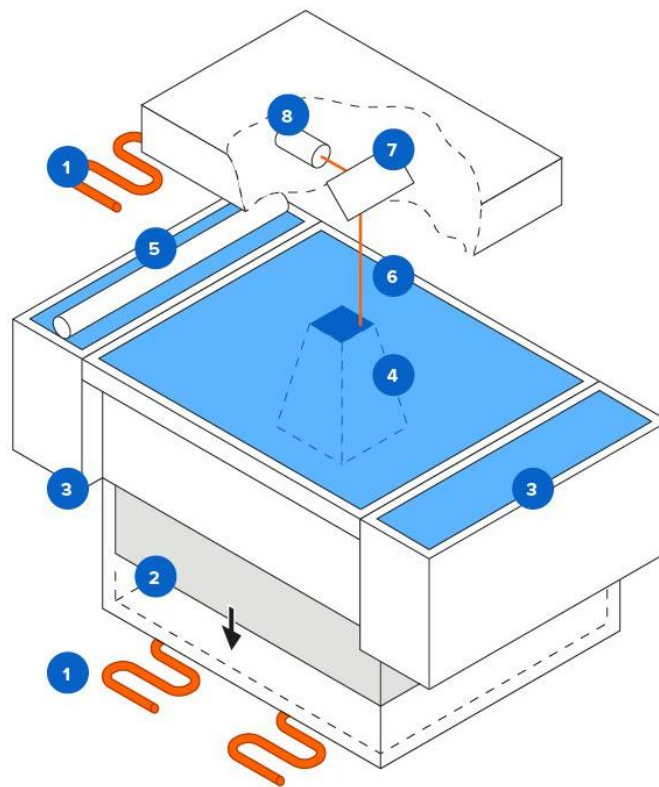


Рис. 1.3 – Схема процесу SLS 3D-друку:

1 - нагрівачі, 2 - камера для побудови, 3 - система подачі порошку, 4 – друкована деталь, 5 - валик для вирівнювання, 6 – лазерний промінь, 7 - поворотне скло, 8 – лазер. [4]

Окрім FDM, SLA та SLS, існує багато інших технологій 3D-друку, які менш поширені через свою вузьку спеціалізацію, високу вартість чи складність обладнання. Нижче наведено короткий огляд таких методів:

#### 1. **Direct Metal Laser Sintering (DMLS) / Selective Laser Melting (SLM)**

Ці технології працюють зі спіканням або плавленням металевих порошків за допомогою лазера, що дозволяє створювати високоточні металеві деталі. Вони широко використовуються в аерокосмічній, медичній і автомобільній промисловості, але через високу вартість обладнання і матеріалів вони доступні переважно для великих компаній.

#### 2. **Binder Jetting**

Технологія базується на використанні сполучного матеріалу, який розпилюється на шар порошку, формуючи модель. Після друку модель піддається обробці, наприклад, запіканню. Binder Jetting дозволяє друкувати деталі з кераміки, металу або піску, але процес вимагає додаткових етапів обробки, що обмежує його застосування.

#### 3. **Material Jetting (MJ)**

У цій технології рідкий матеріал (фотополімер) розпилюється краплями, які затверджуються ультрафіолетовим світлом. MJ забезпечує високу роздільну здатність і можливість створення багатоматеріальних моделей, але є дорогою і має обмеження в масштабах виробництва.

#### 4. **Digital Light Processing (DLP)**

Подібна до SLA, ця технологія використовує цифровий проектор для одночасного затвердіння цілого шару рідкого полімеру. Вона забезпечує швидший друк, але менш універсальна через обмежену кількість матеріалів.

#### 5. **Electron Beam Melting (EBM)**

Ця технологія працює з металевими порошками, які плавляться за допомогою електронного променя. EBM забезпечує дуже високі

характеристики деталей, але вимагає дорогого обладнання і працює у вакуумі, що значно обмежує її поширення.

Хоча ці технології мають потенціал у певних нішевих сферах, вони рідше використовуються через високу складність, вартість або обмеження у виборі матеріалів порівняно з більш універсальними методами, такими як FDM чи SLA.

## **1.2 Технологія FDM: принцип роботи**

Технологія FDM (Fused Deposition Modeling), або ж моделювання методом пошарового нанесення розплаву, є однією з найбільш популярних технологій 3D-друку. Вона була розроблена Скоттом Крапом у 1980-х роках і комерціалізована компанією Stratasys у 1990 році. Сутність методу полягає в тому, що принтер нагріває термопластичний матеріал, такий як ABS або PLA, до стану плавлення, а потім подає його через екструдер, формуючи об'єкт пошарово від основи до верху. Зазвичай FDM-принтери можуть працювати у координатах X, Y і Z, використовуючи шари з заданою висотою і розрахованими траєкторіями руху для побудови кожного шару з CAD-моделі.[5]

### **Принцип роботи**

Основні елементи конструкції FDM-принтера включають:

#### **1. Екструдер**

Складається з подаючого механізму, нагрівального блока та сопла.

Подаючий механізм транспортує філамент (нитку термопластичного матеріалу) до нагрівального блоку. Нагрівальний блок розплавляє філамент, підтримуючи його у рідкому стані. Сопло (зазвичай діаметром 0,4 мм) випускає розплавлений матеріал тонкими шарами.

#### **2. Друкарська платформа**

Використовується як основа для нанесення матеріалу. Часто оснащена системою підігріву, яка покращує адгезію першого шару та запобігає викривленню під час друку.

#### **3. Система руху**

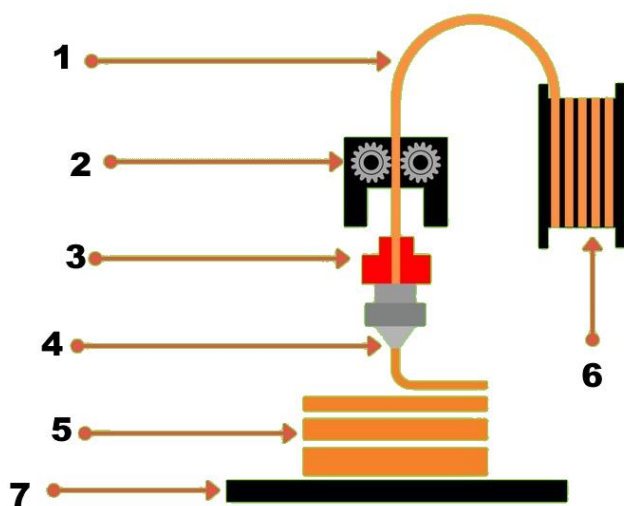
Забезпечує точне переміщення екструдера або платформи по осях X, Y і Z.

Включає крокові мотори, рейкові або ремінні приводи, а також кінцеві вимикачі для обмеження ходу.

#### 4. Контролер і електроніка

Приймає G-код, який визначає траєкторії руху екструдера, температурні параметри та швидкість друку.

Процес друку починається з подачі моделі у форматі STL до слайсера, який розбиває модель на окремі шари та генерує G-код. Екструдер наносить матеріал пошарово, поступово формуючи тривимірний об'єкт. Після завершення друку можуть бути використані методи постобробки, такі як шліфування або фарбування, для поліпшення зовнішнього вигляду та функціональності моделі.



#### Принцип роботи FDM 3D-друку

Рис. 1.4 – Схема процесу FDM 3D-друку:

1 – нитка філаменту, 2 – подаючий механізм, 3 – нагрівальний блок, 4 – сопло, 5 – друкована деталь, 6 – катушка з філаментом, 7 – друкарська платформа. [6]

#### Сфера застосування

FDM (Fused Deposition Modeling) — універсальна технологія 3D-друку, яка широко використовується завдяки доступності, простоті експлуатації та різноманітності матеріалів. Її основні галузі застосування охоплюють прототипування, виробництво функціональних деталей, медицину та освіту.

FDM є ідеальним інструментом для прототипування, що дозволяє створювати фізичні моделі для тестування конструкцій та концептів. Наприклад, у автомобільній промисловості ця технологія використовується для виготовлення корпусів приладів, кріплень і тестових деталей, які дозволяють оптимізувати виробничі процеси. В аерокосмічній індустрії FDM застосовують для друку легких структур, таких як компоненти крил або обшивки, які мають високу міцність та стійкість до навантажень.

У медицині FDM-технологія сприяє виготовленню протезів, ортезів, хірургічних моделей і навіть складних анатомічних реконструкцій. Наприклад, матеріал PEEK використовується для медичних пристроїв завдяки своїй термостійкості та хімічній інертності, що забезпечує надійність у складних умовах експлуатації.

В освітніх цілях FDM-принтери допомагають студентам інженерних та дизайнерських спеціальностей розвивати практичні навички. Університети використовують ці принтери для друку навчальних посібників, архітектурних моделей або для тестування інженерних концептів. Наприклад, студентам пропонують створювати моделі механізмів або працювати з інноваційними матеріалами для розширення своїх знань у сфері адитивного виробництва.

Таким чином, FDM 3D-принтери є невід'ємною частиною сучасних виробничих процесів і навчальних програм завдяки їхній гнучкості та можливостям адаптації під специфічні завдання. Додатково технологія продовжує вдосконалюватися, розширюючи сфери її застосування.

### **1.3 Аналіз недоліків існуючих моделей FDM-принтерів**

FDM-принтери залишаються одними з найпопулярніших завдяки їхній доступності, універсальності та простоті використання. Однак вони мають низку обмежень, які впливають на якість друку, функціональність і зручність експлуатації.

#### **1. Адгезія між шарами.**

Для забезпечення міцності деталей потрібна висока температура і точний контроль швидкості екструзії. Невдалі налаштування можуть призвести до слабкої адгезії шарів, що робить деталі крихкими у вертикальній площині. Від цього найбільше страждають деталі складної геометрії та тонкі структури.

## **2. Проблеми з підтримками**

FDM-принтери не можуть друкувати об'єкти з нависними елементами без додаткових підтримуючих структур. Ці структури зазвичай друкуються з того ж матеріалу, що і модель, що ускладнює їх видалення та може залишати сліди на поверхні. Для вирішення цієї проблеми застосовують водорозчинні підтримки з матеріалів, як-от PVA, але вони збільшують витрати і час друку.

## **3. Обмеження геометрії та роздільної здатності**

FDM-технологія має обмеження в деталізації через "сходинковий ефект" (видимі шари на поверхні моделі), який виникає через пошарове нанесення матеріалу. Зменшення товщини шару покращує якість, але значно збільшує час друку. Крім того, складні дрібні деталі, як-от різьба або тонкі стінки, часто потребують постобробки для досягнення необхідної точності.

## **4. Матеріальні обмеження**

Хоча FDM підтримує широкий спектр матеріалів, деякі з них, наприклад ABS або нейлон, потребують спеціальних умов друку, таких як підігрів платформи чи закрита камера. Без цих умов моделі можуть деформуватися або втрачати міцність. Доступність високотемпературних матеріалів, як-от PEEK або ULTEM, обмежена через високу вартість і вимоги до обладнання.

## **6. Потреба в регулярному обслуговуванні**

Бюджетні FDM-принтери вимагають частого калібрування і догляду, включаючи очищення сопел та перевірку привідних систем. Забруднення сопел або зношення компонентів можуть спричинити збої у друці, наприклад, пропуски шарів або засмічення матеріалу.

Попри ці недоліки, FDM залишається найбільш популярною технологією 3D-друку завдяки її доступності та можливості швидкого виготовлення

функціональних прототипів і деталей. Поліпшення конструкції, налаштувань і використання передових матеріалів допомагають частково долати ці обмеження.

#### **1.4 Можливі рішення для покращення FDM-технології**

Попри популярність та широке використання FDM-технології, існує низка напрямів, які можуть значно підвищити якість друку та розширити можливості 3D-принтерів цього типу. Нижче розглянуто кілька перспективних рішень для подолання обмежень FDM.

Впровадження багатоосьових систем друку. Одним із найбільш інноваційних підходів до вдосконалення FDM-принтерів є додавання додаткових осей, що забезпечує можливість друку без підтримок, підвищення точності та зниження часу друку складних геометрій. 5-осьові принтери, на відміну від звичайних тривісних, здатні обертати друковану деталь під різними кутами, що дозволяє уникнути сходинок ефекту та забезпечує кращу поверхню на нависних елементах без використання підтримок.

Оптимізація траєкторії руху екструдера. За рахунок вдосконалення алгоритмів генерації G-коду, можна зменшити кількість зупинок та змін напрямку руху екструдера, що дозволяє уникнути дефектів на поверхні друкованих виробів. Зокрема, можна застосовувати адаптивні стратегії, які автоматично коригують рух екструдера залежно від складності поверхні моделі.

Поліпшення конструкції сопел. Використання сопел меншого діаметра або спеціально розроблених багатоканальних сопел дозволяє збільшити деталізацію та якість друку. Довші та тонші сопла також здатні досягати глибших шарів і друкувати під різними кутами, що особливо актуально для багатоосьових систем.

Використання нових матеріалів для підтримок. Розробка розчинних або легкознімних підтримок значно спростить процес видалення підтримуючих елементів після друку. Це дозволить уникнути пошкодження поверхні виробу під час зняття підтримок і підвищити якість остаточного продукту.

Зменшення часу друку за допомогою розумного управління температурою. Налаштування температури друку і камери може зменшити деформації матеріалу і поліпшити адгезію між шарами. Деякі сучасні моделі FDM-принтерів оснащені системами підігріву, що забезпечує термічну ізотропію та стабільність виробу під час друку великих і складних деталей.

Ці рішення дозволяють значно розширити можливості FDM-принтерів, зробити їх більш універсальними та здатними конкурувати з іншими методами 3D-друку у випадках, коли потрібна висока точність та складні геометричні форми.

### **1.5 Огляд існуючих способів впровадження додаткових керованих осей**

У процесі дослідження я виявив кілька основних способів впровадження додаткових осей у 3D-друк, які значно розширюють функціональні можливості FDM-принтерів. Ці підходи дозволяють покращити якість друку, уникнути використання підтримок і створювати об'єкти складної геометрії. Нижче наведено детальний опис цих методів із прикладами реалізації.

#### **Роботизована платформа**

У статті Yao, Zhang, Aburaia та Lackner [7] представлено дослідження щодо багатовісного FDM-друку з використанням роботизованої платформи. Основна увага приділена вирішенню проблем традиційного FDM-друку, таких як слабка адгезія між шарами, обмеження у створенні складних геометрій та низька міцність вертикальних шарів.

#### **Конструкція системи**

Система базується на використанні багатовісного роботизованого маніпулятора, який дозволяє друкувати об'єкти за криволінійними траєкторіями. Це досягається за рахунок:

1. Рухливого екструдера: Він підтримує синхронізацію з рухами роботизованої платформи, забезпечуючи плавність нанесення матеріалу на поверхні високої кривизни.
2. Алгоритму планування траєкторій: Розроблено методику створення безперервних шарів на основі поверхонь із криволінійною геометрією. Шари формуються за допомогою спіралей Ферма, що усуває розриви між шарами.
3. Системи контролю: Забезпечує інтеграцію екструзії матеріалу із рухами платформи, що запобігає колізіям та забезпечує високу якість поверхні.

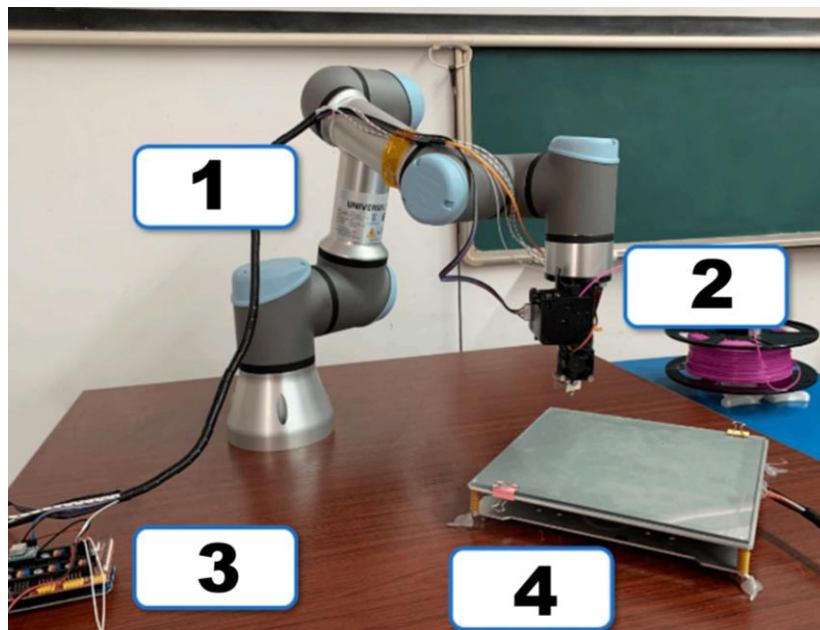


Рис. 1.5 – Роботизована платформа для FDM 3D-друку:

1 – робот-маніпулятор, 2 – екструдер, 3 – плата керування, 4 – друкарська платформа. [7]

#### Результати дослідження

**Покращення міцності:** Використання багатовісного друку дозволило підвищити міцність деталей на розрив на 22–167% порівняно з традиційним методом плоского шарування. Це досягнуто завдяки орієнтації шарів відповідно до головних напрямків напруги.

**Якість поверхні:** Удалося повністю усунути "ефект сходинок", покращивши гладкість поверхонь складної форми.

Друк із безперервними волокнами: Розроблена методика також підтримує друк композитів із безперервними волокнами без використання пристроїв для обрізання. Це значно підвищує механічні властивості деталей.

#### Практичне значення

Методика є перспективною для застосування в галузях, де потрібні деталі з високою механічною міцністю та складною геометрією, таких як авіація, автомобілебудування та біомедицина.



Рис. 1.6 – Результат друку роботизованої платформи [7]

#### "3D-Rotoprinter"

Метод "3D-Rotoprinter", представлений Jonas Duteloff [8], відрізняється від традиційного FDM-друку використанням циліндричної осі замість стандартного плаского столика. Цей підхід передбачає нанесення матеріалу на обертову циліндричну поверхню, що дозволяє створювати моделі складної геометрії без підтримуючих структур. Основою цього процесу є поєднання руху обертового циліндра та стандартного переміщення екструдера по осях X і Z

#### Принцип роботи

На початку друку на платформу встановлюється "заготовка" — порожнистий циліндр, який слугує основою для нанесення шарів. Екструдер наносить матеріал на поверхню, яка обертається, формуючи 3D-об'єкт. По завершенні друку заготовка залишається частиною конструкції або видаляється, залежно від вимог до моделі. Такий підхід є ефективним для створення об'єктів,

що мають центральні отвори або циліндричну симетрію, як-от труби, ролики чи декоративні елементи

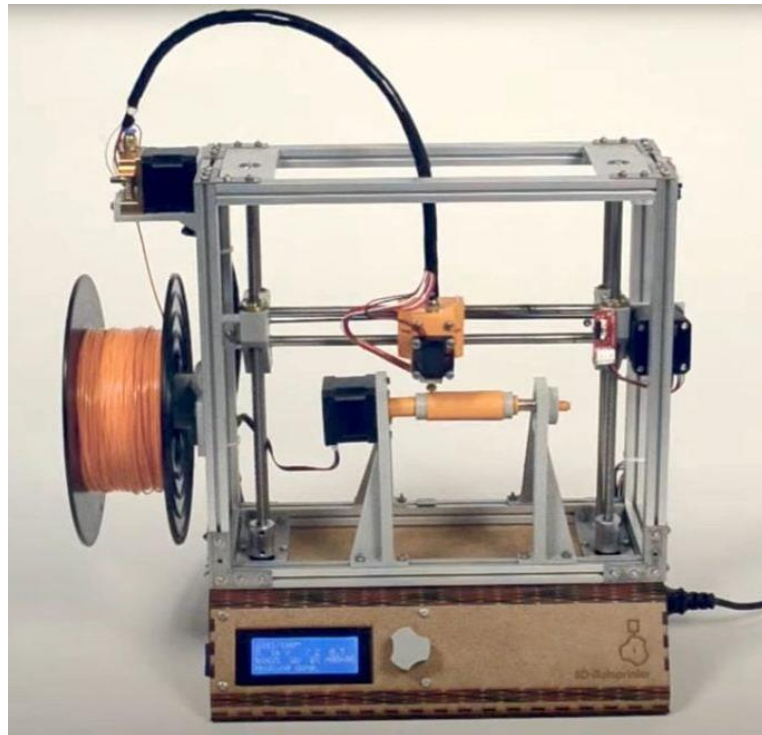


Рис. 1.7 – "3D-Rotoprinter" під час друку [8]

Переваги методу

1. Зменшення підтримок: Обертання дозволяє уникнути використання підтримуючих структур для нависних елементів, знижуючи витрати матеріалу та час друку.
2. Покращення якості поверхні: Нанесення шарів на криволінійні поверхні забезпечує рівномірну текстуру без ефекту "сходинок".
3. Спрощення складних конструкцій: Метод підходить для моделей, які важко виготовити іншими способами, наприклад, об'єктів із внутрішніми каналами чи симетричними кривими.

Недоліки методу:

- Необхідність у спеціальному програмному забезпеченні для адаптації G-коду до обертальних рухів.
- Обмеження в розмірах друкованих об'єктів через використання циліндричної заготовки.

Метод підходить для виготовлення функціональних деталей у промисловості (наприклад, елементів машинобудування) або художніх об'єктів.

### Система “table-table”

Дослідження, виконане Øyvind Kallevik Grutle в рамках магістерської дисертації в Університеті Осло (2015) [5], представляє інноваційний підхід до впровадження п'яти осей у FDM 3D-друк. Головною метою роботи було подолання обмежень традиційних трьохосьових принтерів, таких як низька адгезія між шарами, "ефект сходинок" на похилих поверхнях і потреба у підтримках для складних моделей.

Автор створив багатовісну платформу, названу "Pentarod", на основі модифікованого принтера RepRap Ormerod. Додаткові осі (А та С) були додані до конструкції столу, забезпечуючи можливість друку деталей з адаптивною орієнтацією шарів.

Для управління п'ятьма осями використовували контролер Duex4, інтегрований із прошивкою DC42 Ormerod, яка була модифікована для роботи з додатковими двигунами. Крім того, система використовувала формат G-коду FANUC Type I і II, що дозволяло адаптувати траєкторії друку до складних поверхонь.

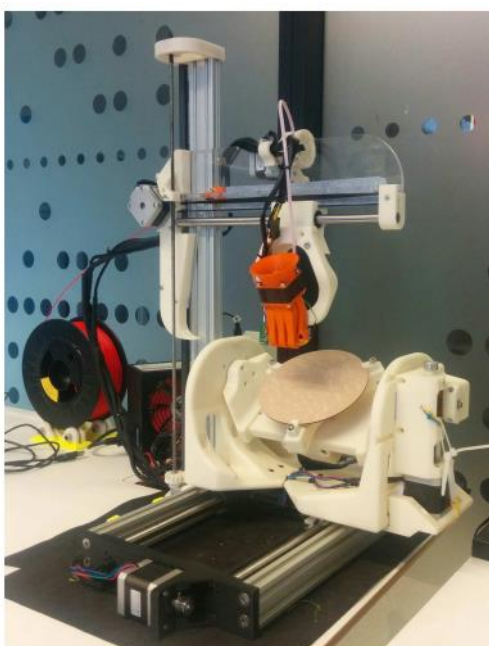


Рис. 1.8 – 5-осьовий принтер "Pentarod" [5]

Система дозволяє друкувати моделі з гладкими поверхнями, розташованими в площинах, відмінних від XY, і усуває необхідність використання підтримок. Автор довів, що цей підхід скорочує час друку, знижує витрати на матеріали та дозволяє створювати деталі зі змінною міцністю, орієнтованою на функціональне навантаження. Grutle випробував два прототипи 5-осьового принтера.

Перша версія мала недоліки у механізмі передачі руху, тоді як друга, створена за місяць, показала значно кращу продуктивність. Система також використовувалася для друку складних геометрій, демонструючи покращену адгезію шарів і можливість друку на багатовекторних траєкторіях. Дослідник планує опублікувати проект у відкритому доступі, щоб інші могли адаптувати та вдосконалювати концепцію багатовісного друку.



Рис. 1.8 – Результати друку 5-осьового принтера (зліва) у порівнянні із звичайним друком з підтримками (справа). [5]

## **2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ FDM 3D-ПРИНТЕРІВ**

### **2.1 Рама та корпус**

Рама та корпус є основними конструкційними елементами 3D-принтера, які забезпечують стабільність, точність та ефективність друку. Вони утримують всі компоненти пристрою та забезпечують необхідну жорсткість для виконання точних рухів друкуючої головки та платформи. У цьому підрозділі розглянемо конструктивні особливості відкритих та закритих рам, їх переваги, недоліки, а також вплив на якість друку та експлуатаційні характеристики FDM-принтерів.

#### **Типи рам та їх характеристики**

##### **1. Відкриті рами**

Відкриті рами зазвичай виготовляють з алюмінієвих профілів, які забезпечують легкість, жорсткість та низьку вартість. Дизайн дозволяє легко отримувати доступ до всіх компонентів принтера для обслуговування та модернізації.

#### **Переваги:**

- Доступність і нижча вартість порівняно із закритими системами.
- Простота налаштування та доступність для користувача, особливо новачків у 3D-друці.
- Полегшений контроль друку в реальному часі.

#### **Недоліки:**

- Уразливість до зовнішніх впливів, таких як протяги, пил та зміни температури.
- Знижений рівень безпеки через доступ до рухомих та гарячих компонентів, що може бути критичним у середовищах із дітьми чи домашніми тваринами.

##### **2. Закриті рами**

Рами із закритими корпусами виготовляють з металу чи пластику та оснащують прозорими панелями для візуального контролю. Вони створюють контрольоване середовище для друку.

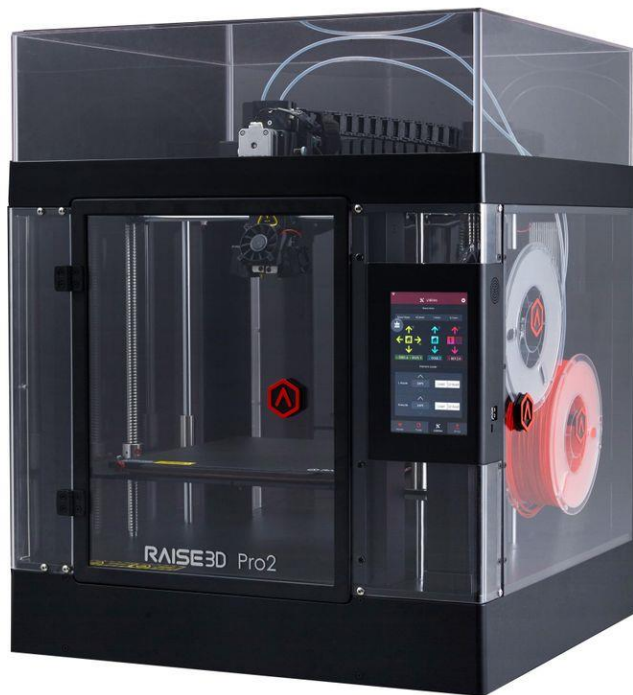


Рис. 2.1 – 3D-принтер Raise3D Pro2 із закритою рамою. [9]

### **Переваги**

- Стабільна температура всередині камери сприяє друку складних матеріалів, таких як ABS чи Nylon, які схильні до деформацій під час охолодження.
- Зниження рівня шуму та захист від запахів під час друку.
- Збільшена безпека, що знижує ризик контакту з рухомими чи гарячими частинами.

### **Недоліки**

- Вища вартість.
- Ускладнений доступ до внутрішніх компонентів під час обслуговування чи модернізації.

Рама і корпус 3D-принтера значною мірою визначають його функціональність, безпеку та довговічність. Вибір між відкритою та закритою рамою залежить від цілей використання, бюджету та умов роботи. У випадку FDM-принтера Ender 3 відкритий дизайн забезпечує широкий простір для модифікацій, але при інтеграції додаткових керованих осей може виникнути потреба в закритій рамі для поліпшення умов друку.

## 2.2 Система руху по осях X, Y, Z

Система руху по осях X, Y, Z є ключовим компонентом 3D-принтера, оскільки забезпечує точність і плавність переміщень екструдера та друкованого столу, від яких безпосередньо залежить якість друку. Для забезпечення цих вимог використовуються різні компоненти, кожен із яких відіграє важливу роль.

### Типи систем руху

Найпоширеніші системи руху в FDM 3D-принтерах включають:

#### 1. Картезіанська система (Cartesian)

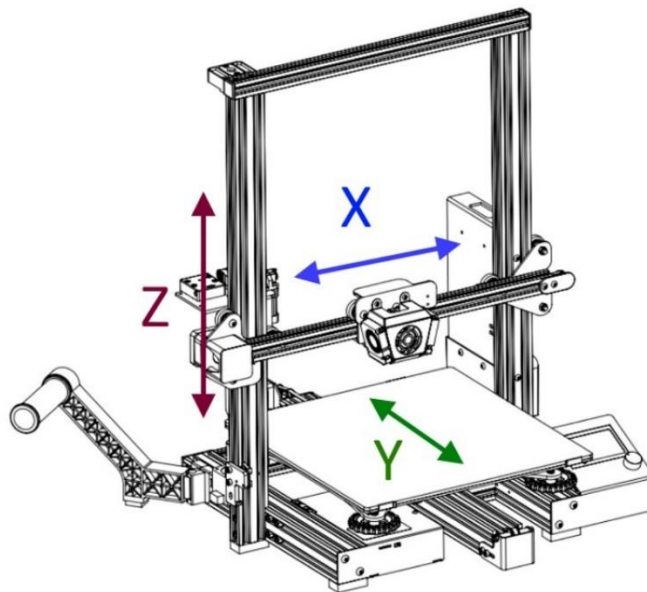


Рис. 2.2 – 3D-принтер з картезіанською системою руху. [10]

У стандартній картезіанській системі для кожної осі використовується окремий кроковий двигун. Ці двигуни під'єднані до гвинтових пар або ременів, які перетворюють обертальний рух двигуна в лінійний рух вздовж відповідної осі. Для забезпечення плавного та прямолінійного переміщення друкуючої головки система обладнана лінійними напрямними або рейками.

Однією з ключових характеристик стандартної картезіанської системи в 3D-принтерах є переміщення друкарської платформи вздовж осі Y. Через це такі принтери іноді називають "bedslingers". Рухома платформа потребує

додаткового простору спереду та ззаду принтера, щоб забезпечити її вільне переміщення. Однак ця конструктивна особливість може спричиняти певні труднощі: під час друку великих моделей рухома платформа може впливати на якість друку через потенційну нестабільність або вібрації. Також дизайн із рухомою платформою обмежує швидкість роботи принтера, оскільки при підвищенні швидкості можливе зниження точності.

Незважаючи на ці можливі обмеження, стандартна картезіанська система зазвичай є менш затратною завдяки своїй простій конструкції та меншій кількості компонентів. Незалежне управління кожною віссю спрощує калібрування та обслуговування, що робить цю систему зручною для початківців або аматорів. Вона підходить для завдань, де обмеження швидкості не є критичними, а важливими є надійність і простота обслуговування. Проте для задач, які потребують вищої швидкості або точності, можуть бути більш ефективними інші системи приводу.

## 2. H-Bot

Як і у картезіанському принтері, екструдер у системі H-Bot переміщується вздовж осі X за допомогою напрямної. Однак рух уздовж осі Y досягається переміщенням всієї друкуючої головки разом із напрямною та двигуном у напрямку Y, а не рухом платформи. Така конструкція формує "H"-подібну форму, звідки походить назва "H-Bot". Завдяки відсутності рухомої платформи система забезпечує швидші та плавніші рухи порівняно зі стандартною картезіанською системою. Рух платформи вздовж осі Z контролюється окремим двигуном, що здійснює вертикальні переміщення.

Основною особливістю системи H-Bot є те, що платформа для друку переміщується виключно вертикально вздовж осі Z. Такий статичний XY-позиціонування створює більш стабільну платформу для друку, що зменшує ризик коливань або вібрацій, які можуть негативно впливати на якість моделі. Крім того, завдяки відсутності рухомих елементів у горизонтальній площині, ця система не потребує додаткового простору з боків принтера, що робить його більш компактним у порівнянні зі стандартними картезіанськими принтерами.

Попри те, що система H-Vot зазвичай є дорожчою через складнішу конструкцію та додаткові компоненти, вона має значні переваги для деяких сценаріїв використання. Ця система особливо підходить для завдань, які вимагають високої точності та швидкості, а також у випадках, коли потрібен компактний дизайн принтера. Однак для початківців або для задач, де важливішими є простота та легкість обслуговування, стандартна картезіанська система може залишатися кращим вибором.

### 3. CoreXY

Система руху CoreXY є більш удосконаленим типом механізму, який забезпечує вищу швидкість і точність порівняно зі стандартними картезіанськими та H-Vot системами. Як і H-Vot, CoreXY використовує два двигуни для управління рухами вздовж осей X і Y, але при цьому має унікальну конфігурацію ременів, яка дозволяє досягти вищих швидкостей друку.



Рис. 2.3 – 3D-принтер з CoreXY системою руху. [10]

У системі CoreXY два крокові двигуни з'єднані механічно через складну систему ременів. Ця конфігурація дозволяє обом двигунам одночасно забезпечувати рух уздовж обох осей (X і Y), залишаючи їх нерухомими. Такий підхід знижує вагу, яку потрібно переміщувати, що сприяє швидшому та

точнішому друку. Як і в системі H-Bot, вертикальний рух платформи вздовж осі Z контролюється окремим двигуном.

Хоча система CoreXY дозволяє досягти високої швидкості, її складна конфігурація ременів ускладнює збірку, калібрування та обслуговування. Збільшена кількість рухомих компонентів може підвищити ризик механічних збоїв з часом. Крім того, вартість системи CoreXY зазвичай вища, ніж у картезіанських або H-Bot систем, через її складність та додаткові компоненти.

Система CoreXY ідеально підходить для застосувань, які вимагають високої швидкості та точності. Однак її складність може зробити її менш підходящою для початківців або для ситуацій, де пріоритетом є простота та легкість обслуговування, а не швидкість.

#### 4. Delta

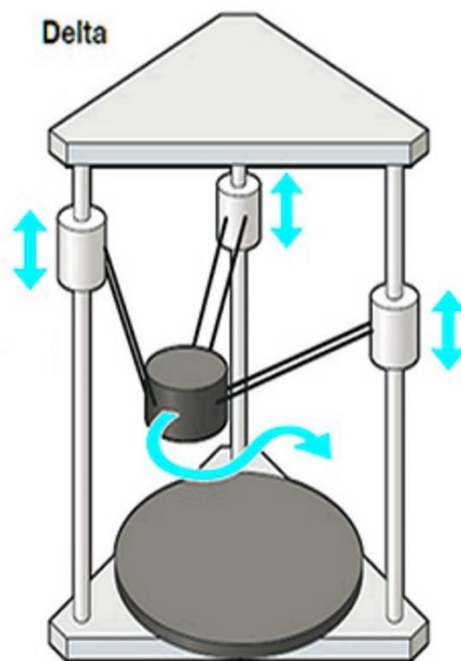


Рис. 2.4 – Схема 3D-принтера з системою руху Delta. [10]

Система руху Delta — це унікальний і інноваційний механізм, який використовується в FDM 3D-принтерах. Назва цієї системи походить від її схожості з грецькою літерою Delta. Вона суттєво відрізняється від картезіанських систем, таких як Standard Cartesian, H-Bot і CoreXY.

У системі Delta рух друкуючої головки по осях X, Y і Z забезпечується трьома вертикально розташованими кроковими двигунами. Ці двигуни працюють синхронно, маніпулюючи набором шарнірних важелів, до яких прикріплена друкуюча головка. Унікальною особливістю цієї системи є те, що всі три двигуни одночасно беруть участь у русі по всіх трьох осях, забезпечуючи плавність і високу точність позиціонування.

Однак складна кінематика руху Delta-системи робить її більш складною у налаштуванні, калібруванні та обслуговуванні. Вона використовує круглу платформу для друку, яка може бути менш інтуїтивною у використанні в порівнянні з прямокутними платформами картезіанських систем. Незважаючи на складність, Delta-система пропонує високий рівень точності та швидкості, подібно до конфігурації CoreXY.

Через свою складність та високу точність, Delta-системи зазвичай дорожчі, ніж стандартні картезіанські або H-Vot системи. Вони також зазвичай обмежені у розмірі зони друку, через що стали менш поширеними на ринку.

### **Крокові двигуни**



Рис. 2.5 – Кроковий двигун серії Nema 17. [11]

Крокові двигуни забезпечують точне позиціонування екструдера та друкованого столу. У FDM 3D-принтерах зазвичай використовуються:

- NEMA 17 – найпоширеніший тип двигунів, що забезпечує оптимальне співвідношення між потужністю та розмірами.
- NEMA 23 – потужніший варіант для систем, де потрібна більша сила чи швидкість.

Важливими параметрами крокових двигунів є:

- Кроковий кут (зазвичай  $1.8^\circ$  або  $0.9^\circ$ ), який визначає точність позиціонування.
- Струм – визначає потужність і тепловіддачу двигуна.
- Крутний момент – має бути достатнім для переміщення платформи чи екструдера без зривів.

### **Механізми передачі руху**

Передача руху від крокового двигуна до механізмів забезпечується різними способами:

- Гвинтові передачі. Використовуються для руху по осі Z. Переваги включають високу точність і відсутність люфтів. Найбільш поширені типи – трапецієподібні гвинти та кулькогвинтові передачі (Ball Screw).
- Ремінні передачі. Зазвичай використовуються для руху по осях X і Y. Вони забезпечують високу швидкість і плавність руху. Для зменшення люфтів використовуються натяжні механізми.
- Шестерні. Менш поширені в 3D-принтерах, але можуть використовуватися в окремих проєктах для спеціалізованих завдань.

### **Кінцеві вимикачі**

Кінцевики використовуються для визначення початкового положення екструдера та столу. Існують такі типи кінцевиків:

- Механічні кінцевики. Простий і недорогий варіант. Мають обмежений ресурс через зношення контактів.
- Оптичні кінцевики. Використовують світлодіод і фотодатчик для виявлення перешкоди. Забезпечують більшу точність і тривалий термін служби.
- Індуктивні/ємнісні датчики. Використовуються для визначення позиції безконтактним способом, наприклад, для автоматичного калібрування столу.

### **Напрявні для руху**

Напрявні є важливими елементами FDM 3D-принтерів, оскільки вони забезпечують точність, стабільність і плавність руху по осях X, Y і Z. Основними типами напрямляючих, які використовуються в сучасних 3D-принтерах, є лінійні вали, лінійні рейки та алюмінієві профілі.

### **Лінійні вали**



Рис. 2.6 – Карбоновий лінійний вал. [12]

Лінійні вали є одним із найпоширеніших рішень для забезпечення лінійного руху в 3D-принтерах. Вони виготовляються переважно з хромованої сталі, що забезпечує міцність і довговічність, а їхній діаметр зазвичай становить 8 мм. У парі з валиками використовуються лінійні підшипники або кулькові втулки, які зменшують тертя та забезпечують плавний рух друкуючої головки або платформи. Система лінійних валів є дешевшою альтернативою лінійним рейкам і достатньо ефективною для більшості завдань у 3D-друці.

Попри простоту та доступність, лінійні вали мають свої обмеження. Їхня ефективність залежить від точності калібрування: навіть невелике відхилення може спричинити нерівномірний рух і вплинути на якість друку. Також із часом підшипники та поверхня валів можуть зношуватися, особливо якщо використовуються матеріали низької якості. Для зменшення люфту зазвичай застосовуються дві паралельні осі, що збільшує габарити конструкції порівняно з компактними лінійними рейками.

Незважаючи на ці недоліки, лінійні вали залишаються популярним вибором, особливо в бюджетних моделях 3D-принтерів. Їхня простота в установці та обслуговуванні робить їх привабливими для користувачів, які шукають економічно ефективне рішення. Нові розробки, такі як використання карбонових волокон замість сталі, можуть покращити характеристики валів, зробивши їх легшими та жорсткішими. Однак такі інновації потребують додаткової обробки для забезпечення точності. [12]

### **Лінійні рейки**

Лінійні рейки є сучасним рішенням для забезпечення руху в 3D-принтерах, яке пропонує високу точність і плавність роботи порівняно з традиційними лінійними валиками. Вони часто використовуються в моделях преміум-класу та модернізованих конструкціях для підвищення якості друку.



Рис. 2.7 – Лінійна рейка і каретки. [14]

Лінійні рейки працюють завдяки шарнірним підшипникам, які забезпечують мінімальний люфт і зменшують тертя. Це дозволяє друкуючій головці або платформі переміщуватися плавніше і з вищою точністю. У порівнянні з валиками, рейки краще витримують навантаження, що робить їх ідеальними для великих і важких платформ або деталей. Вони також менш схильні до зношування при правильному обслуговуванні, що підвищує їхню довговічність і надійність у використанні.

Попри очевидні переваги, лінійні рейки є дорожчими та складнішими в установці. Вони вимагають більш точного вирівнювання під час монтажу, оскільки навіть незначний дисбаланс може негативно вплинути на плавність роботи. До того ж, рейки потребують регулярного очищення, щоб уникнути накопичення пилу, яке може заважати руху.

Завдяки високій точності та стійкості до навантажень, лінійні рейки ідеально підходять для професійних застосувань, де важлива якість друку та довговічність. Їх активно використовують у принтерах для інженерних задач і в галузях, які вимагають високої деталізації та надійності, наприклад у медицині та аерокосмічній сфері.[13]

### **V-подібні ролики**



Рис. 2.8 – Алюмінієвий профіль і V-подібні ролики. [14]

Більшість 3D-принтерів на ринку сьогодні використовують систему V-роликів, що ковзають по алюмінієвому профілю. Однак, зазначається, що ця система схильна до вібрацій більше, ніж лінійні рейки, має більший люфт, а також із часом може змінювати свою геометрію. Через це потрібно частіше перевіряти та підлаштовувати колеса.

Традиційні V-подібні напрямні добре працюють для осей X/Y майже на будь-якому FDM-принтері з практичною робочою областю XY. Однак виникають проблеми при використанні цієї системи для консолі осі Z. У таких випадках спостерігається надмірний люфт між колесами, пластинами та екструзією, що робить V-колеса менш ефективними для великих і важких консолей. Крім того, колеса можуть зношуватися після тривалого використання. [14].

### **2.3 Екструдер**

Процес обробки матеріалу — від плавлення до видачі — здійснюється у вузлі, відомому як екструдер. Хоча екструдер не є механічно складним, він складається з кількох компонентів, які забезпечують узгоджену роботу.

Дехто розглядає екструдер як частину, що складається лише з двигуна і механізмів подачі нитки. Інші включають до екструдера і гарячий кінець (hot end), де відбувається плавлення матеріалу. Для простоти ми розглянемо весь вузол — і холодний, і гарячий кінці.

### **Холодний кінець екструдера (Cold end)**

Холодний кінець є верхньою частиною системи екструзії. Тут нитка вводиться і направляється у гарячий кінець для плавлення і нанесення. Розташування холодного кінця залежить від типу екструдера:

- Прямий екструдер (Direct): нитка подається безпосередньо до гарячого кінця, що забезпечує більш стабільний друк.
- Bowden-екструдер: нитка проходить через спеціальну трубку (PTFE) перед подачею у гарячий кінець.

Основні компоненти, які забезпечують подачу нитки, знаходяться саме у холодному кінці.

Холодний кінець зазвичай складається з таких компонентів:

1. Кроковий двигун. Крокові двигуни є ключовим компонентом сучасних настільних 3D-принтерів. Це безщіткові двигуни постійного струму, які забезпечують високу точність і повний крутний момент на низьких швидкостях. Це необхідно для точної подачі нитки у гарячий кінець.
2. Зубчасті колеса та механізми передачі
  - Прямий привід (Direct Drive): зубчасте колесо закріплено безпосередньо на валу двигуна і передає момент нитці.
  - Редукторний екструдер (Geared Extruder): використовуються додаткові зубчасті колеса для збільшення крутного моменту, що забезпечує стабільнішу подачу матеріалу.
3. Канал подачі філаменту. У системах із прямим приводом і Bowden-екструдерах важливу роль відіграє те, наскільки щільно нитка утримується у каналі подачі. Проміжки між компонентами можуть спричинити згинання гнучких ниток або проблеми з подачею на високих швидкостях.

Гнучкі матеріали, наприклад TPU, особливо чутливі до таких недоліків, тому важливо, щоб канал подачі нитки був повністю закритим.

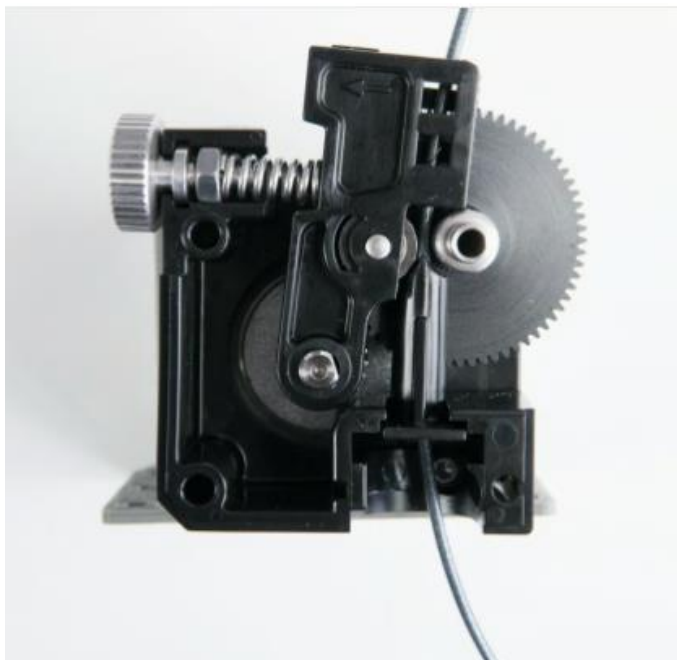


Рис. 2.9 – Механізм подачі філаменту. [15]

### **Гарячий кінець (Hot end)**

Це місце, де відбувається плавлення нитки і її видавлювання через сопло на будівельну платформу. Хоча конструкція гарячого кінця здається простою, в ньому є декілька ключових компонентів, які працюють разом для досягнення стабільного та точного друку. Основні елементи гарячого кінця наведені нижче:

#### **1. Трубка подачі**

Трубка подачі нитки використовується в Bowden-екструдерах для спрямування нитки з холодного кінця в гарячий. У прямих екструдерах (Direct Drive) нитка часто подається прямо в гарячий кінець без трубки.

#### **2. Теплова ізоляція та радіатор**

Теплова ізоляція (heat break) створює бар'єр між гарячими і холодними зонами, щоб уникнути нагріву нитки передчасно (явище "heat creep"). Теплова ізоляція зазвичай виготовляється з нержавіючої сталі або титану, що запобігає передачі тепла. Радіатор із охолоджувачем (вентилятором або водяною системою) допомагає підтримувати стабільність температури.

### 3. Нагрівальний блок

Виготовляється з алюмінію і забезпечує передачу тепла від нагрівального картриджа до сопла. Основні елементи: Нагрівальний картридж: підвищує температуру блоку до потрібного рівня. Термістор: передає температуру блоку на плату принтера для корекції нагрівання.

### 4. Сопло

Сопло має отвір фіксованого діаметра, через який виходить розплавлена нитка. Типові розміри сопел: 0,4 мм (стандарт) або інші для специфічних задач.

Матеріали сопел:

- Латунь: підходить для PLA і ABS.
- Нержавіюча сталь, рубін: використовуються для міцних або абразивних матеріалів (карбонових волокон тощо).

Різновиди гарячих кінців

1. Традиційні (PEEK/PTFE): Використовують полімерні ізолятори, але обмежені температурою через ризик розкладання.
2. Повністю металеві (All Metal): Виготовлені для друку матеріалів, що потребують високих температур. Вони більш надійні та безпечні при роботі з технічними нитками.



Рис. 2.10 – Складові частини гарячого кінця: нагрівальний блок, термобар'єр, термістор, сопло та нагрівальний картридж. [15]

## Сопло

У стандартному настільному 3D-принтері "з коробки" зазвичай встановлене сопло діаметром 0,4 мм. Швидше за все, воно виготовлене з латуні. Це чудовий вибір для друку звичайних матеріалів, таких як PLA і ABS. Однак, при роботі із складнішими матеріалами, наприклад філаментами, наповненими металом, м'якість латуні може створити проблеми.

При постійному використанні філаментів, які містять тверді частинки, сопло поступово зношується. З часом це призводить до деформації отвору та внутрішніх розмірів сопла, що впливає на якість друку. Тому для друку "міцних" або філаментів із наповнювачами доцільно використовувати загартовані сопла.

Ось огляд матеріалів для 3D-принтерних сопел, доступних на ринку:

### 1. Латунь

Дешеві та прості у виробництві, латунні сопла є стандартним вибором для побутових 3D-принтерів.

Латунь — це стандартний матеріал для 3D-принтерних сопел. Це найм'якший матеріал серед доступних. Латунні сопла легко обробляти, вони дешеві та широко доступні, що робить їх ідеальними для стандартних налаштувань. Їхня відмінна теплопровідність також робить латунь популярним вибором для спеціалізованих сопел, які використовують твердіші матеріали лише для своїх наконечників.

Характеристики:

- Висока теплопровідність
- Стійкість до корозії
- Відносна м'якість
- Низька стійкість до стирання

Латунні сопла найкраще використовувати для "м'яких" пластикових філаментів, таких як PLA, ABS, PETG, та інших філаментів, що не містять твердих частинок (наприклад, металу чи вуглецевого волокна).

### 2. Сталь

Більш тверда, ніж латунь, сталь у різних формах широко використовується для виготовлення сопел 3D-принтерів. Зазвичай це нержавіюча або загартована сталь, яка забезпечує довготривалий друк філаментами, насиченими твердими частинками, такими як вуглецеве волокно чи метал, без ризику стирання сопла та втрати якості друку.

Одним із недоліків сталевих сопел є їхня погана теплопровідність у порівнянні з латунними. Це може призвести до нестабільного потоку, особливо при використанні сопел великого розміру.

Характеристики:

- Низька теплопровідність
- Стійкість до корозії
- Відносно тверді
- Висока стійкість до стирання

Стальні сопла найкраще використовувати для філаментів з твердими домішками, такими як метал, вуглецеве волокно та скло.

### 3. Рубін

Для виготовлення сопел 3D-принтерів використовуються різні матеріали, серед яких є досить екзотичні. Olsson Ruby — одне з таких сопел. Його розробив Андерс Олссон, науковий інженер з Упсальського університету у Швеції, для конкретного експерименту, який передбачав 3D-друк філаментом зі сплавом бор-карбїду. Після використання лише 1 кг цього філаменту стандартні латунні та сталеві сопла ставали непридатними через сильне зношення.

Так було створено Olsson Ruby: латунне сопло з рубіновим наконечником. Воно зберігає теплопровідність латуні та поєднує її з відмінною стійкістю до стирання рубїна (зокрема, оксиду алюмінію).

Можна припустити, що рубіновий елемент у соплі Olsson Ruby має низьку теплопровідність, через що в деяких випадках він може бути менш надійним, проте таких зауважень в Інтернеті майже немає.

Характеристики:

- Висока теплопровідність

- Стійкість до корозії
- Висока стійкість до стирання

Як і у випадку зі сталевими соплами, головним призначенням є друк високоабразивними філаментами. Однак це сопло було спеціально розроблено для друку третього за твердістю матеріалу у світі, витримуючи навантаження навіть після кількох сотень грамів матеріалу.



Рис. 2.11 – Сопло із рубіновим накінецьником. [15]

### Розміри сопел

Діаметр сопла впливає на рівень деталізації ваших друків, визначаючи не лише ширину ліній, але й рекомендовану висоту шарів. При друку з використанням сопла розміром 0,15 мм у порівнянні зі стандартним 0,4 мм є очевидна перевага: теоретично можна досягти більш високої роздільної здатності по осях X та Y. Тонші лінії можуть забезпечити чіткіші кути, але це можливо лише на добре налаштованому і підтримуваному 3D-принтері. Це не означає, що ви не можете використовувати менші сопла, навіть якщо ваш принтер не ідеально налаштований.

Загальне правило говорить, що діаметр сопла повинен визначати висоту шарів. Оптимально друкувати шари висотою приблизно 25–50% від діаметра сопла.

Це, разом із правильно відкаліброваною платформою, забезпечує краще зчеплення між шарами. Наприклад, для стандартного сопла діаметром 0,4 мм рекомендується друк із висотою шару 0,1–0,2 мм.

Щоб мати більше шансів успішно друкувати супертонкі шари нижче 0,05 мм, варто обрати сопло розміром 0,2 мм.

Однак це лише загальні рекомендації, і експерименти з налаштуваннями принтера можуть забезпечити успішний друк навіть поза цими рамками.

Використання сопел із меншим отвором збільшує ймовірність засмічення. Через менший шлях руху матеріалу частинки, які проходять крізь більше сопло, можуть застрягти у меншому. Будьте готові до регулярного очищення і розблокування.

Ще одним недоліком використання менших сопел є значне збільшення часу друку, оскільки потрібно більше проходів друкуючої головки, щоб покрити ту ж площу, що і більшим соплом.

Збільшення діаметра сопла може суттєво покращити друк. Ширші лінії екструзії можуть значно скоротити час друку: стінка завтовшки 0,8 мм друкується вдвічі швидше, ніж дві лінії завтовшки 0,4 мм.

Крім того, більші екструзії забезпечують кращу міцність виробів. Ці переваги роблять великі сопла ідеальними для швидкого прототипування, коли дрібні деталі не є пріоритетом.

Однак, використання великих ліній екструзії погіршує деталізацію поверхні, адже товстіші лінії пластику природно знижують точність друку порівняно з меншими соплами.

Можна стверджувати, що переваги маленьких сопел обмежені хобі чи професіями, де потрібні деталі, наприклад, створенням моделей або ювелірних виробів. Для пересічного користувача немає особливих причин вибирати менше 0,4 мм, адже цей розмір є стандартним для більшості 3D-принтерів.

## **Види екструдерів**

### **1. Прямий екструдер**

Прямий екструдер відрізняється тим, що екструдерний мотор розміщується безпосередньо над гарячою частиною (hot end). Таке розташування мінімізує відстань, яку філамент повинен подолати до гарячої частини, і дозволяє більш надійно друкувати гнучкими філаментами.

Проте наявність прямого екструдера не означає, що принтер обов'язково зможе друкувати з гнучкими філаментами. М'які, хвилясті філаменти можуть потрапити у неконтрольовані шляхи. Для успішного друку з гнучкими матеріалами важливо звертати увагу на канал подачі філаменту всередині холодної частини екструдера.

Перевагою прямих екструдерів є кращий контроль над втягуванням. Оскільки екструдер розташований безпосередньо над гарячою частиною, відстань між дією прищипки та філаментом, що проходить через тепловий бар'єр до гарячої частини, менша. Тому філаменту важче згинатися та деформуватися під тиском.

Також варто зазначити, що прямий екструдер робить головку принтера більш об'ємною і високою. Оскільки на гарячу частину додається мотор та інші компоненти, екструдер збільшує масу головки принтера. Тому виробники використовують менші і легші екструдери з редукторами, а також посилюють кінематику принтерів, щоб зменшити вплив маси.

## 2. Bowden-екструдери

Відмінність між bowden- та прямими екструдерами можна уявити у вигляді двох сценаріїв. У випадку bowden-екструдера холодна частина виведена з головки принтера, і тому не рухається разом з гарячою частиною під час друку. Це означає, що холодна частина знаходиться на деякій відстані від гарячої частини та плавлення філаменту.

У випадку прямого екструдера холодна частина монтується безпосередньо над гарячою частиною, зменшуючи відстань, яку філамент має подолати перед плавленням.

Розташування bowden-екструдера має одну суттєву перевагу: головка принтера стає легшою і має меншу масу, що дозволяє гарячій частині рухатися

на вищих швидкостях без виникнення дефектів друку через резонанс, таких як розриви (гострі контури).

### **Порівняння прямих та Bowden-екструдерів**

Механічно Bowden-екструдер для 3D-принтерів не відрізняється від прямого екструдера. Ви все ще маєте кроковий мотор, який приводить в рух зубчасте колесо або гвинт з нарізкою, що захоплює філамент, який проходить через нього.

Однак, оскільки філамент має пройти певну відстань, перш ніж потрапити в гарячу частину для плавлення, необхідно використовувати PTFE трубку для його направлення. Ця трубка, зазвичай з внутрішнім діаметром трохи більшим за діаметр філамента, обмежує шлях матеріалу та дозволяє холодній частині екструдера здійснювати тиск під час подачі.

Існує поширена думка, що прямі екструдери мають кращий контроль за подачею філамента до гарячої частини, завдяки своєму розташуванню безпосередньо зверху – навіть кращий, ніж у Bowden-екструдерів. Звісно, правда, що налаштування зворотної подачі (retraction) можуть вимагати більш тонкого налаштування з Bowden-екструдером.

Існують поширені аргументи за і проти Bowden-екструдерів та прямої подачі – в основному проти Bowden-екструдерів, з їхньою нібито нездатністю обробляти гнучкі філаменти.

Такі аргументи, ймовірно, виникли через розвиток і появу гнучких філаментів для 3D-друку та спроби їх використання в 3D-принтерах, які були створені до того, як ці матеріали стали доступні. З цієї причини існує певна стигма щодо Bowden-екструдерів і їхньої нібито нездатності друкувати гнучкими філаментами.

Хоча справедливо, що багато дешевих 3D-принтерів не зможуть ефективно працювати з гнучкими філаментами, це не обов'язково через те, що вони використовують Bowden-екструдери. Швидше за все, це через те, що ті Bowden-

екструдери, які вони використовують, не були спроектовані для роботи з гнучкими матеріалами.

Кожен екструдер здатний подавати або тягнути гнучкі філаменти. Проблеми виникають, коли цей філамент неефективно обмежений поза точкою захоплення екструдера. Це є конструкційною особливістю навіть деяких прямих екструдерів.

Такий гнучкий матеріал, як TPU, м'який і рухливий, тому його потрібно краще направляти через екструдер, щоб уникнути заламування і намотування навколо рухомих компонентів. При друці гнучкими філаментами, потрібно обмежити відкритий простір між точкою захоплення філамента зубчастим колесом та його входом до гарячої частини.

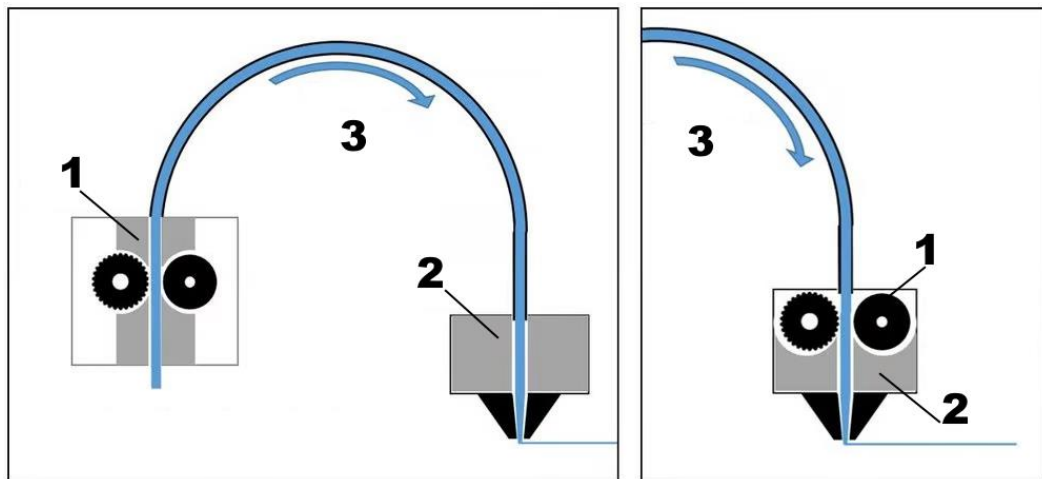


Рис. 2.12 – Порівняння Bowden (зліва) та прямого (справа) екструдерів. 1- механізм подачі філаменту, 2 – гарячий кінець (hot end), 3 – траєкторія руху філамента. [15]

## 2.4 Електроніка та система управління

### Плати управління 3D принтерів

Плати управління є основними елементами електроніки 3D принтера, які відповідають за керування процесом друку, включаючи рух осей, подачу матеріалу, нагрів екструдерів та платформи, а також моніторинг стану принтера в реальному часі. У випадку з FDM принтерами, важливою є можливість

підтримки додаткових осей для забезпечення розширених функцій, таких як рух платформи по двох додаткових осях.

Серед найбільш популярних плат управління для 3D принтерів можна виділити:

RAMPS 1.4 – одна з найбільш розповсюджених плат управління для FDM принтерів, яка використовується разом з Arduino Mega 2560. Вона підтримує до 5 осей, що дозволяє легко додавати додаткові керовані елементи, такі як нові осі чи додаткові екструдери. RAMPS 1.4 є доступною і широко підтримуваною на ринку, проте її головним обмеженням є відсутність вбудованих функцій для підключення до більш складних систем керування (наприклад, через Ethernet або Wi-Fi).

Переваги: доступність, універсальність, підтримка широкого спектра сенсорів і аксесуарів.

Обмеження: потребує додаткового налаштування для роботи з більш ніж трьома осями (особливо для складних модифікацій).

Duet 2 / Duet 3 – більш потужні та сучасні плати, які забезпечують високу продуктивність та можливість управління великою кількістю осей (до 7 осей на платі Duet 3). Вони оснащені потужними процесорами і мають можливість підключення через Wi-Fi або Ethernet для віддаленого моніторингу і керування. Duet плати також підтримують скрипти G-коду для додаткової гнучкості у налаштуваннях.

Переваги: велика кількість підтримуваних осей, висока точність керування, можливість підключення через інтерфейси.

Обмеження: вища ціна, потребує більш складного налаштування для новачків.

Einsy RAMBO – плата управління, розроблена для популярного 3D принтера Prusa i3 MK3. Вона сумісна з прошивкою Marlin, що дозволяє керувати до 5 осей. Плата має компактні розміри і зручна для використання в принтерах середнього рівня.

Переваги: висока якість, компактність, проста інтеграція з багатьма принтерами.

Обмеження: обмежена кількість підтримуваних осей.

Плати управління відрізняються за кількістю підтримуваних осей, типами з'єднань, можливостями інтеграції з іншими системами та доступними функціями. Вибір плати залежить від складності модифікації принтера, бажаної кількості осей та вимог до продуктивності.

RAMPS 1.4 зазвичай використовується для бюджетних модифікацій, де важлива доступність, але може знадобитися більше часу для налаштування.

Duet 3 є ідеальним вибором для складних модифікацій, коли необхідно управляти великою кількістю осей або створити принтер із додатковими функціями (наприклад, підключення через Wi-Fi).

Einsy RAMBO — оптимальний варіант для середнього класу принтерів з мінімальними вимогами до модифікацій.

### **Прошивка для плат управління 3D принтерів**

Прошивка є важливою частиною програмного забезпечення для 3D принтерів, що забезпечує взаємодію між платами управління, сенсорами, двигунами та іншими компонентами принтера. Вона визначає, як принтер виконує різні операції, від базового руху осей до роботи з різними типами матеріалів і підтримки додаткових функцій, таких як керування додатковими осями.

Основні типи прошивок для 3D принтерів:

Marlin — найбільш популярна прошивка для FDM принтерів, яка підтримує широкий спектр плат управління, таких як RAMPS 1.4, Duet, Rambo та інші. Вона є зручним рішенням для персоналізованих принтерів та для користувачів, які хочуть додати додаткові функції, наприклад, нові осі або спеціальні режими друку. Marlin також підтримує різні датчики, калібрування та навіть можливість підключення до Wi-Fi для віддаленого моніторингу.

Переваги: відкритий код, велика кількість налаштувань, підтримка великої кількості сенсорів і модифікацій.

Обмеження: потребує більш детального налаштування, особливо для специфічних налаштувань багатокерованих осей.

RepRapFirmware — спеціалізована прошивка для плат Duet, яка надає значно більше можливостей для керування принтером через мережу, включаючи доступ через інтерфейси Ethernet або Wi-Fi. Вона особливо корисна для користувачів, які хочуть працювати з великою кількістю осей або створювати більш складні налаштування.

Переваги: підтримка багатьох осей (до 7), керування через Wi-Fi, висока точність налаштувань.

Обмеження: менш популярна серед бюджетних користувачів через необхідність наявності специфічного обладнання.

Smoothieware — прошивка, що працює на більшості плат, які використовують ARM-процесори (наприклад, Smoothieboard). Вона забезпечує високу швидкість обробки сигналів та інтеграцію з різними функціями, включаючи керування додатковими осями. Зазвичай використовується для високопродуктивних принтерів.

Переваги: висока швидкість і точність, велика кількість доступних функцій.

Обмеження: вимагає наявності спеціальних плат, таких як Smoothieboard, що робить її менш доступною для загального використання.

Функції та налаштування прошивок для додаткових осей

Для того, щоб додати додаткові керовані осі до 3D принтера, прошивка повинна підтримувати налаштування, які дозволяють програмувати додаткові рухи. Більшість сучасних прошивок дозволяють це зробити через конфігураційні файли, де можна налаштувати параметри для кожної осі окремо.

Marlin підтримує додаткові осі, що дозволяє користувачам додавати осі для переміщення платформи або навіть нові екструдери. Це здійснюється через редагування конфігураційного файлу, де вказується кількість осей та їхні рухи.

RepRapFirmware має ще більш гнучку систему налаштувань для багатокерованих принтерів, включаючи можливість додавати нові осі через прості інтерфейси, що не потребують глибоких змін у коді.

Smoothieware дозволяє підключати додаткові осі за допомогою простих команд конфігурації, що робить цю прошивку зручною для використання в складних проектах.

Ключові аспекти налаштування прошивок для розширення осей:

Калібрування: для коректної роботи з додатковими осями необхідно точно налаштувати їхні параметри, включаючи кроки на мм, максимальні швидкості та прискорення.

Підтримка додаткових сенсорів: для управління додатковими осями часто використовуються сенсори (наприклад, для визначення положення платформи або екструдерів). Прошивка повинна бути здатна інтегрувати такі сенсори.

Підключення до інтерфейсів: більшість сучасних прошивок підтримують підключення через інтерфейси Ethernet або Wi-Fi для віддаленого моніторингу та керування процесом друку.

### **Способи генерації G-коду для 3D принтерів**

G-код є основним етапом в процесі 3D друку, оскільки визначає, як екструдер рухатиметься по осі X, Y та Z, а також яким чином матеріал буде виведений під час друку. Генерація G-коду — це процес перетворення 3D моделі в серію команд для принтера, що визначають рухи, екструзію та інші дії.

Процес генерації G-коду починається з 3D моделі, створеної в програмі CAD (Computer-Aided Design). Моделі повинні бути збережені у форматі STL або OBJ, які потім перетворюються в G-код за допомогою слайсера — програмного забезпечення, що підготовляє 3D модель для друку. Основні слайсери включають:

Cura — один з найбільш популярних і відкритих слайсерів, який надає користувачам можливість налаштовувати величезну кількість параметрів, таких як швидкість друку, температура, щільність заповнення і т.д. Це програмне

забезпечення підтримує всі основні принтери та дозволяє налаштувати генерований G-код для широкого спектра матеріалів.

Переваги: простота в налаштуванні, широкий вибір параметрів, підтримка багатьох 3D принтерів.

Обмеження: може потребувати додаткових налаштувань для специфічних функцій, таких як додаткові осі.

PrusaSlicer — слайсер, розроблений компанією Prusa для своїх принтерів, але також підтримує інші моделі. Відомий своїми точними налаштуваннями і оптимізованим підходом до друку на FDM-принтерах.

Переваги: оптимізація для принтерів Prusa, налаштування для покращеної точності та якості.

Обмеження: орієнтований на принтери Prusa, хоча і підтримує інші принтери, налаштування можуть бути складними.

Simplify3D — це комерційне програмне забезпечення, яке пропонує більш розширені функції для налаштування G-коду, зокрема можливість створення специфічних налаштувань для складних моделей.

Переваги: можливість створювати власні профілі для G-коду, велика кількість функцій для користувачів, що шукають точність.

Обмеження: платне програмне забезпечення, потребує налаштування.

Функції слайсерів при генерації G-коду

Розрізання моделі на шари: Слайсер бере 3D модель і розбиває її на шари, задаючи висоту кожного шару. Чим менший шар, тим вища деталізація, але також більший час друку. Це дозволяє контролювати товщину шару для досягнення бажаної якості.

Налаштування параметрів екструзії: Кожен слайсер дозволяє користувачам налаштувати параметри екструзії, такі як швидкість, температура і тип заповнення, що впливає на кінцеву якість виробу.

Підтримка та стратегії друку: Слайсери мають інструменти для додавання підтримки для складних моделей, визначення оптимальних рухів головки принтера та розподілу матеріалу для покращення адгезії та зменшення дефектів.

## Інтеграція додаткових осей у G-кодi

Для принтерiв, що мають додатковi керованi осi (наприклад, додатковi осi для руху платформи або екструдерiв), слайсери повиннi генерувати G-код, який враховує цi осi та їхнi специфiкацiї. Це вимагає коректного налаштування прошивки та пiдтримки цих осей в програмi слайсера:

N-осi: Багато слайсерiв, таких як Marlin або RepRapFirmware, можуть бути налаштованi для роботи з додатковими осями, що дозволяє включити новi рухи в процес друку. Для цього в G-код додаються команди, якi враховують додатковi осi.

Модифiкацiї G-коду: Користувачi повиннi налаштувати додатковi осi в прошивцi принтера i в програмi слайсера, щоб G-код правильно вiдображав додатковi рухи. Це може включати спецiальнi налаштування для кожної осi та контроль за їх рухами через програму.

### Програми для генерацiї G-коду для специфiчних принтерiв

Slic3r — безкоштовний слайсер, що також пiдтримує генерацiю G-коду для спецiальних осей. Він дозволяє деталiзувати параметри екструзiї та пiдключення додаткових екструдерiв.

IdeaMaker — слайсер для принтерiв Raise3D, який пiдтримує додатковi осi та екструдери для складних моделей.

Генерацiя G-коду є важливим етапом у процесi 3D друку, особливо для принтерiв з додатковими осями. Вибiр правильного слайсера та налаштування його для роботи з додатковими компонентами принтера є критичним для досягнення високої точностi та якостi друку. Програмне забезпечення повинно бути адаптоване до специфiчних потреб принтера та пiдтримувати всi можливостi, що дозволяють оптимiзувати роботу з додатковими осями.

## **2.5 Вибiр основних конструктивних елементiв для 5-осьового принтера**

Базова рама 3D-принтера є ключовим елементом, який забезпечує стабiльнiсть конструкцiї та точнiсть друку. При переходi до 5-осьової кiнематики

конструкція повинна мати достатню жорсткість, щоб витримувати додаткові навантаження від обертальних осей та зберігати стабільність при роботі з новою кінематичною схемою. Крім того, базова рама повинна бути адаптивною для монтажу додаткових вузлів, таких як поворотна платформа чи механізми нових керованих осей.

У якості основи для 5-осьового принтера обрано раму популярної моделі Ender 3. Цей вибір обумовлений такими чинниками:

- **Механічна** **стабільність**  
Рама Ender 3 виготовлена з профілів з анодованого алюмінію, які забезпечують високу жорсткість при невеликій вазі. Це дозволяє підтримувати точність друку навіть при значних механічних навантаженнях.
- **Модульність** **конструкції**  
Конструкція Ender 3 передбачає легке розбирання та модифікацію. Завдяки стандартним алюмінієвим профілям V-Slot її можна легко доповнити елементами, такими як поворотні осі, додаткові кріплення чи підсилювальні конструкції.
- **Доступність** **і** **популярність**  
Ender 3 є однією з найпоширеніших моделей 3D-принтерів. Завдяки цьому її легко знайти як на первинному, так і на вторинному ринку за доступною ціною. Вживані або відновлені принтери часто коштують дешевше, ніж комплектуючі для побудови нової рами з нуля. Така економічність робить цей варіант особливо привабливим для проєктів модернізації.
- **Сумісність** **із** **додатковими** **елементами**  
Рама Ender 3 має стандартні отвори та кріплення, що дозволяють встановлювати більшість лінійних напрямних, ротаційних механізмів і вузлів керованих осей. Завдяки цьому адаптація конструкції до нових вимог мінімізує потребу у виготовленні нестандартних компонентів.

Рама Ender 3 обрана через її високу жорсткість, модульність, доступність на вторинному ринку та низьку вартість. Вживаний або відновлений принтер дозволяє зменшити витрати на створення 5-осьового 3D-принтера, водночас забезпечуючи базу, яка відповідає всім технічним вимогам для модернізації.



Рис. 2.14 – 3D-принтер Creality Ender 3 V2 [17]

### **Вибір напрямних для поворотної платформи**

Для реалізації 5-осьової кінематики важливо забезпечити точне та стабільне переміщення поворотної платформи, яка є основним елементом для обертальних осей. Напрямні повинні бути здатні витримувати не тільки вертикальні навантаження, але й моменти сили, які виникають при обертанні платформи. Таким чином, вибір напрямних для поворотної платформи має важливе значення для забезпечення точності та стабільності друку.

Одним із оптимальних варіантів для цього типу конструкції є використання лінійних рельсів, що постачаються виробником як частина

модернізаційного комплексу для Ender 3. Ці рельси мають кілька важливих переваг:

- **Висока точність переміщення**  
Лінійні рельси забезпечують точне та плавне переміщення платформи, що критично важливо для підтримки високої точності на всіх етапах друку. Вони мінімізують люфти, що можуть виникати при використанні інших типів напрямних, таких як звичайні втулки чи підшипники.
- **Жорсткість і стабільність**  
Лінійні рельси мають високу жорсткість, що дозволяє зберігати стабільність платформи під час руху, навіть при великих навантаженнях. Це особливо важливо при введенні додаткових осей, які можуть змінити динамічні характеристики конструкції.
- **Довговічність та надійність**  
Рельси мають низький рівень зносу завдяки своїй конструкції, що забезпечує їхню довговічність і стабільну роботу в умовах високих навантажень. Це дозволяє зменшити витрати на обслуговування та частоту заміни компонентів.
- **Підвищена вантажопідйомність**  
Враховуючи додаткові осі і поворотну платформу, лінійні рельси здатні витримувати підвищені навантаження без втрати точності, що важливо для збереження геометрії деталей при друці. Це також дозволяє забезпечити кращу стабільність платформи при її обертанні.
- **Простота в інтеграції**  
Лінійні рельси, що постачаються виробником для модернізації, вже мають стандартні розміри та кріплення, що полегшує інтеграцію їх у конструкцію принтера без потреби в складних адаптаціях. Завдяки цьому можна легко здійснити модернізацію, зберігаючи при цьому високу якість друку та надійність конструкції.

Для досягнення оптимальних характеристик слід вибирати лінійні рельси, які мають гарну репутацію за якістю та точністю. Багато виробників, що постачають комплектуючі для Ender 3, пропонують рельси, які спеціально призначені для модернізацій цих принтерів. Вони можуть бути як оригінальними, так і сторонніми, але важливо, щоб їхні розміри та характеристики відповідали вимогам для установки в систему 5-осьового принтера.

Вибір лінійних рельсів для поворотної платформи є оптимальним рішенням для забезпечення точного, плавного та стабільного переміщення при модернізації Ender 3 у 5-осьовий принтер. Висока точність, жорсткість і довговічність цих компонентів дозволяють створити ефективну систему, що відповідає вимогам до точності друку та стабільності конструкції. Крім того, готові комплекти, що постачаються виробником, полегшують процес модернізації та інтеграції нових елементів у принтер.



Рис. 2.15 – Комплект для заміни рельсових напрямних для Y-осі [18]

### **Вибір крокових двигунів**

Для управління рухом 5-осьового принтера важливо забезпечити точність та високий момент сили на кожній осі. Крокові двигуни є оптимальним вибором для таких задач, оскільки вони забезпечують точне та надійне позиціонування без

необхідності в зворотному зв'язку. Вибір крокових двигунів має враховувати кілька важливих аспектів: необхідну потужність для роботи з додатковими осями, точність руху, а також здатність витримувати навантаження на осі при роботі з додатковими механізмами.

Одним з найбільш підходящих варіантів для модернізації Ender 3 до 5-осьового принтера є використання крокових двигунів серії NEMA 17 з кроком  $0.9^\circ$ . Для цього проекту було обрано двигун 17HM3410, що виробляється компанією NBE Lison. Ця модель є високоточним і потужним рішенням для забезпечення стабільної роботи додаткових осей 3D-принтера.

Технічні характеристики двигуна 17HM3410 [19]:

- Тип двигуна: Кроковий, NEMA 17
- Крок:  $0.9^\circ$
- Номінальна напруга: 3.6 В
- Номінальний струм: 1.7А
- Крутний момент: 0.45 Nm (4.5 кг·см)
- Робоча температура:  $-20^\circ\text{C}$  до  $50^\circ\text{C}$
- Індуктивність: 2.8 мН  $\pm$  20% (1kHz)
- Опір: 1.2 Ом  $\pm$  10%
- Розміри: 42 x 42 x 34 мм
- Маса: 0.22 кг

Переваги вибору цього двигуна:

#### 1. Точність та стабільність

Кроковий двигун 17HM3410 забезпечує точність переміщення на рівні  $0.9^\circ$  на крок, що є критично важливим для забезпечення точного руху 5-осьового принтера. З таким кроком двигун здатен точно переміщати осі на мінімальні відстані, що забезпечує високу якість друку та стабільність роботи.

#### 2. Потужність і момент сили

Завдяки крутному моменту 0.45 Nm (4.5 кг·см) цей двигун здатний ефективно переміщати важкі компоненти, такі як поворотна платформа

або додаткові осі. Це забезпечує стабільну роботу принтера, навіть при додаткових навантаженнях, які виникають під час роботи з додатковими рухомими елементами.

### 3. Температурні характеристики

Двигун має широкий діапазон робочих температур від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ , що дозволяє використовувати його в умовах різних температурних режимів без ризику перегріву або зниження ефективності. Це є важливим для стабільної роботи принтера, який може працювати в різних умовах.

### 4. Низька вартість

Двигуни серії NEMA 17, зокрема модель 17HM3410, є доступними за ціною, що робить їх економічно вигідним вибором для модернізації принтера. Це дозволяє здійснити необхідні модифікації без суттєвих додаткових витрат.

Кроковий двигун 17HM3410 фірми NBE Lison серії NEMA 17 з кроком  $0.9^{\circ}$  є оптимальним вибором для модернізації Ender 3 до 5-осьового принтера. Він забезпечує необхідну точність, потужність та стабільність для роботи з додатковими осями, має достатній крутний момент для стабільної роботи навіть з важкими компонентами і має доступну ціну, що робить його вигідним варіантом для цього проекту.

## **Вибір екструдера**

Для модернізації Ender 3 до 5-осьового принтера було обрано екструдер Creality Direct Drive Sprite. Цей екструдер є однією з найновіших розробок від компанії Creality і забезпечує високу ефективність, точність і надійність при роботі з різними матеріалами. Вибір саме цієї моделі обумовлений кількома ключовими перевагами:

Технічні характеристики екструдера Creality Direct Drive Sprite:

- Тип: Direct Drive
- Наявність крокового двигуна: Вбудований кроковий двигун для подачі філаменту

- Принцип роботи: Подача філаменту безпосередньо до екструзійного механізму, що мінімізує втрати матеріалу і підвищує точність подачі
- Сумісність з матеріалами: Підтримує широкий спектр матеріалів, включаючи PLA, ABS, PETG, TPU та інші
- Швидкість подачі: Підвищена швидкість подачі при збереженні стабільності екструзії
- Конструкція: Компактний дизайн, що забезпечує точність та зручність при налаштуванні
- Охолодження: Покращена система охолодження для зниження нагріву і підвищення ефективності роботи

Переваги вибору екструдера Creality Direct Drive Sprite:

#### 1. Вища точність і стабільність

Екструдер Creality Direct Drive Sprite має вбудований кроковий двигун для більш точного контролю над подачею філаменту. Це дає змогу знизити ймовірність засмічення або неповної екструзії, що є важливим для забезпечення високої якості друку, особливо на додаткових осях.

#### 2. Сумісність з різними матеріалами

Цей екструдер підтримує широкий спектр матеріалів, що дозволяє використовувати не лише стандартні пластикові матеріали (PLA, ABS), але й більш складні, такі як TPU для гнучких деталей або PETG для більш міцних виробів. Це дає додаткову гнучкість при друці і розширює можливості для виготовлення більш складних об'єктів.

#### 3. Простота інтеграції і налаштування

Екструдер Creality Direct Drive Sprite має компактну конструкцію, що забезпечує легкість у монтажі та налаштуванні. Це особливо важливо при модернізації принтера до 5-осьової версії, оскільки додаткові осі можуть вимагати оптимізації конструкції і точності налаштувань.

#### 4. Покращене охолодження і надійність

Завдяки ефективній системі охолодження, екструдер запобігає перегріву і забезпечує стабільну подачу матеріалу під час тривалих сеансів друку. Це

важливо для збереження якості друку при роботі на всіх осях, де можливі більші навантаження на механізми.

#### 5. Мінімізація втрат матеріалу

Оскільки екструдер Creality Direct Drive Sprite має прямий привід, це дозволяє значно зменшити втрати матеріалу і підвищити точність екструзії. Прямий привід дозволяє безпосередньо подавати філамент до гарячого кінця, що забезпечує стабільність і точність навіть при використанні гнучких або твердих матеріалів.

Екструдер Creality Direct Drive Sprite є оптимальним вибором для модернізації Ender 3 до 5-осьового принтера. Його компактна конструкція, висока точність подачі матеріалу, сумісність з широким спектром матеріалів та ефективна система охолодження роблять його ідеальним для роботи на додаткових осях 3D-принтера. Цей екструдер дозволить досягти високої якості друку навіть з більш складними матеріалами та зменшити ймовірність механічних проблем під час роботи принтера.



Рис. 2.16 – Комплект для заміни екструдера Creality Sprite Pro [19]

#### **Вибір плати керування та прошивки**

Для реалізації проекту розширення технологічних можливостей 3D-принтера шляхом додавання додаткових керованих осей було обрано плату керування Duet 2 із розширювачем DueX5, а також прошивку Marlin з конфігурацією RAMPS 5 LINEAR\_AXES. Ці компоненти забезпечують необхідну функціональність, масштабованість та точність для роботи з багатовісною системою.

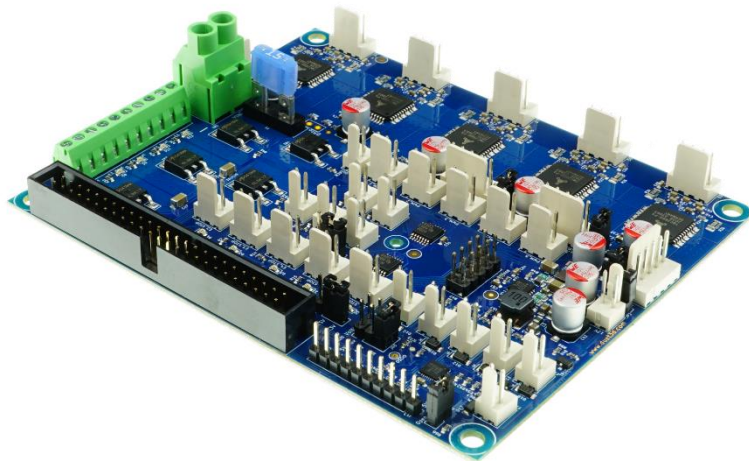


Рис. 2.17 – Плата розширення для керування додатковими 5 двигунами DueX5.[20]

Duet 2 — це потужна 32-бітна плата керування 3D-принтерами, яка розроблена для забезпечення високої точності та гнучкості в налаштуваннях. Вона використовує мікроконтролер ARM Cortex-M4 з тактовою частотою 120 МГц, що дозволяє одночасно керувати кількома осями та виконувати складні обчислення в реальному часі. Основні особливості Duet 2:

- Інтеграція мережі Ethernet для віддаленого управління та моніторингу.
- Керування до п'яти двигунів через вбудовані драйвери TMC2660, які підтримують мікрокрок до 1/256.
- Інтерфейс для розширення: можливість підключення додаткових компонентів через UART, SPI та I2C.

Для забезпечення роботи з більшою кількістю осей використовується Duet5 — розширювальна плата, яка додає ще п'ять драйверів двигунів, додаткові порти для термісторів, вентиляторів і кінцевиків. Duet5 дозволяє масштабувати систему до 12 незалежних керованих осей, що ідеально підходить для реалізації 5-осьової конфігурації принтера.

Переваги вибору Duet 2 та Duet5:

- Висока продуктивність і точність завдяки використанню сучасних драйверів двигунів.
- Гнучкість у налаштуваннях, зокрема можливість змінювати кінематику та додавати додаткові осі.
- Інтуїтивно зрозумілий веб-інтерфейс для управління.

Marlin є однією з найпоширеніших прошивок для 3D-принтерів, яка підтримує широкий спектр апаратного забезпечення і функцій. Її було обрано через стабільність, гнучкість і можливість налаштування під багатовісні системи. Конфігурація RAMPS 5 LINEAR\_AXES [21] дозволяє працювати з п'ятьма незалежними лінійними осями, що є важливою умовою для реалізації даного проекту. Основні переваги Marlin:

Підтримка багатовісних конфігурацій: окрім стандартних осей X, Y та Z, додаткові осі (наприклад, A і B) можуть бути запрограмовані як незалежні.

Гнучке налаштування кінематики: дозволяє використовувати різні кінематичні схеми, включаючи багатовісні конфігурації.

Сумісність із Duet 2: хоча Marlin часто асоціюється з іншими платами, його можна адаптувати до Duet 2, що розширює можливості цієї плати.

Для налаштування прошивки використовувалися такі ключові параметри:

У файлі Configuration.h було активовано параметр `#define NUM_AXES 5` для роботи з п'ятьма осями. Для кожної осі визначено її кінематику, напрямок руху, кінцеві вимикачі та швидкість. Параметри екструзії та температури були оптимізовані для роботи з матеріалами, які використовуються у 5-осьовому друці.

Комбінація плати Duet 2 із розширювачем Duex5 та прошивки Marlin з конфігурацією `RAMPS 5 LINEAR_AXES` забезпечує необхідну функціональність для реалізації 5-осьової системи. Ці компоненти дозволяють досягти високої точності, стабільності та гнучкості у налаштуваннях, що є критично важливим для розширення технологічних можливостей 3D-принтера.

## 3 ПРОЕКТУВАННЯ ПЛАТФОРМИ З ДОДАТКОВИМИ КЕРОВАНИМИ ОСЯМИ

### 3.1 Проектування основи поворотної платформи в середовищі Autodesk Inventor

Для проектування основи поворотної платформи була обрана програма Autodesk Inventor, яка надає можливість створення параметричних моделей та проведення симуляцій механічної роботи конструкції. Виготовлення основи вирішено виконати методом 3D-друку, що забезпечує гнучкість у дизайні, швидкість виробництва та можливість інтеграції складних геометричних елементів у конструкцію.

Основою платформи є П-подібна конструкція, яка забезпечує жорсткість і компактність, зберігаючи сумісність із принтером Ender 3. Деталь проектувалась за допомогою стандартних інструментів середовища Autodesk Inventor, такими як ескіз, елемент «видавлювання», «обертання» та інші.

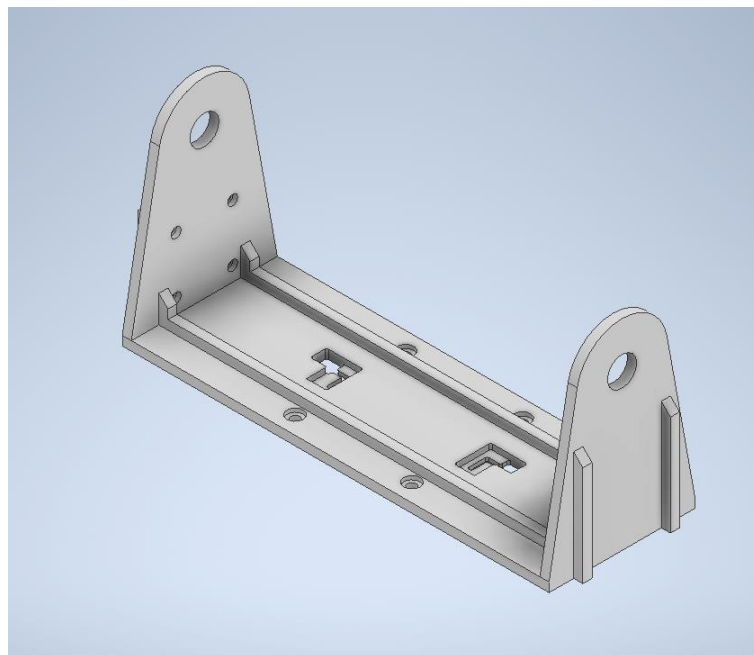


Рис. 3.1 – Основа платформи з додатковими керованими осями

Для забезпечення сумісності основи з конструкцією Ender 3 були враховані такі особливості:

Отвори для кріплення: Дно платформи містить отвори, які ідентичні розташуванню кріпильних точок оригінального столика. Це дозволяє закріпити платформу без додаткових модифікацій.

Пази для ремня осі Y: У нижній частині конструкції передбачені спеціальні пази для надійної фіксації ремня осі Y, що забезпечує стабільність роботи стандартної кінематики.

У конструкції основи інтегровані елементи для реалізації осі обертання U:

Кріплення для крокового двигуна: На передньому торці платформи передбачено кріпильні отвори для монтажу крокового двигуна. Вони забезпечують надійність і сумісність із стандартними двигунами NEMA 17.

Фланцеві підшипники: У корпусі основи інтегровані отвори під фланцеві підшипники, які підтримують вісь U, знижуючи тертя та забезпечуючи стабільність обертання.

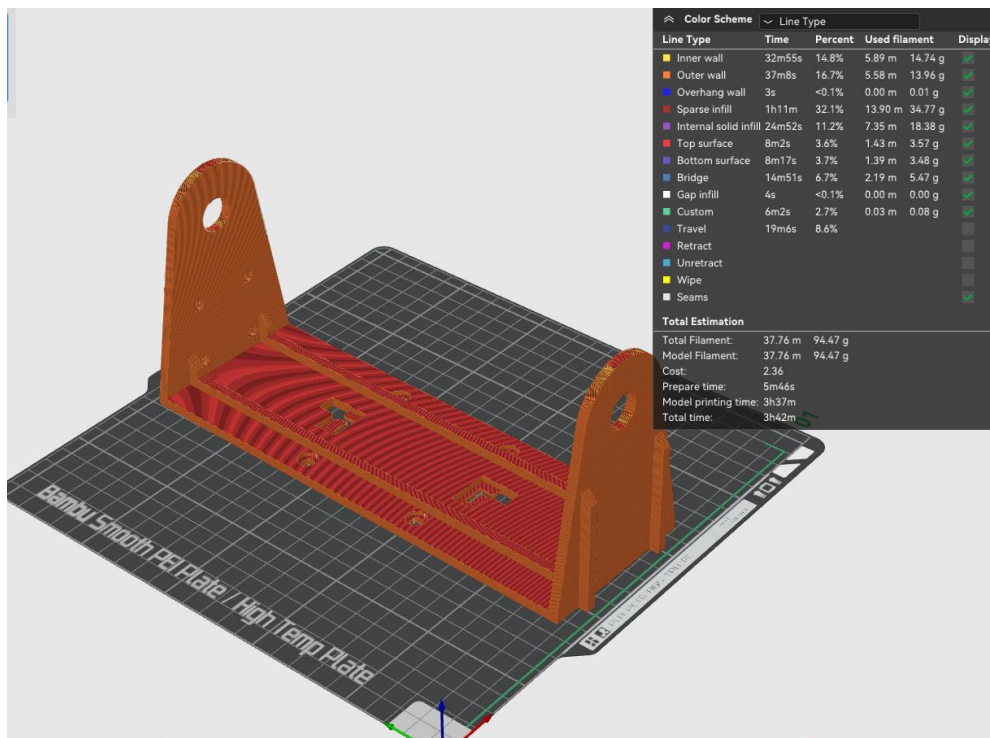


Рис. 3.2 – Створення керуючої програми для друку деталі основи

Матеріали та особливості 3D-друку

Для виготовлення основи було ABS через такі переваги:

Механічна стабільність: ABS забезпечує достатню жорсткість для підтримки конструкції, водночас зменшуючи масу порівняно з металевими аналогами.

При друку основи передбачено такі параметри:

Товщина шару: 0.2 мм для забезпечення деталізації.

Заповнення: 30-40% для балансу між жорсткістю та економією матеріалу.

Орієнтація друку: Платформа друкується у положенні, яке мінімізує потребу в підтримках, зокрема, П-подібна частина розташовується горизонтально.

Привід осі U був інтегрований у конструкцію основи платформи.

Використання методу 3D-друку для виготовлення основи платформи дозволяє поєднати гнучкість у дизайні з високою функціональністю та сумісністю.

Аналогічним чином було побудовано наступні деталі:

1. Кріплення двигуна осі U:

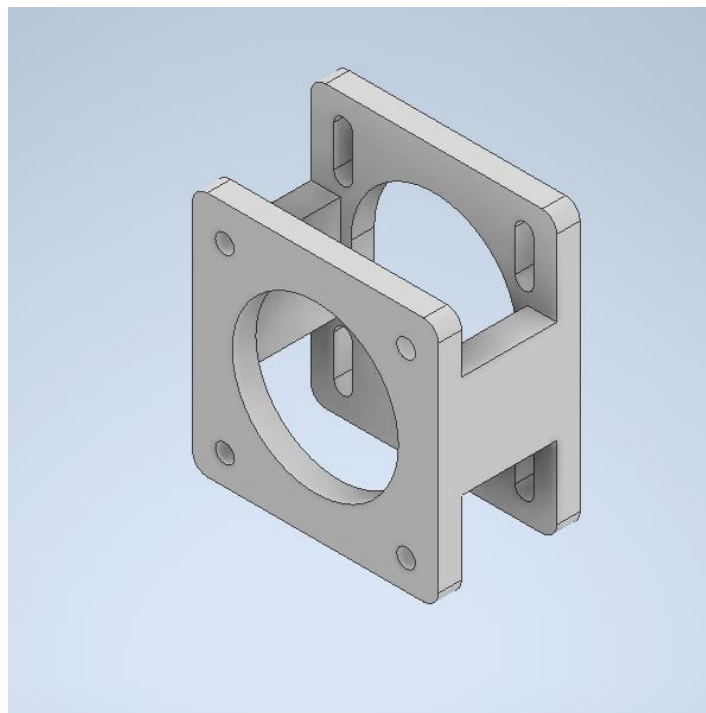


Рис. 3.3 – Деталь “Кріплення двигуна осі U ”

Кріплення двигуна осі U виконує подвійну функцію: фіксацію двигуна та регулювання натягу ремня приводу. Двигун закріплюється на спеціальному кронштейні за допомогою стандартних гвинтів М3. Сам кронштейн встановлюється на платформу через продольні отвори, що дозволяє змінювати його положення. Регулювання натягу ремня здійснюється шляхом переміщення кронштейна в межах пазів і подальшого затягування гвинтів у потрібному положенні. Це забезпечує надійну фіксацію та зручність у налаштуванні.

## 2. Каретка осі обертання U:

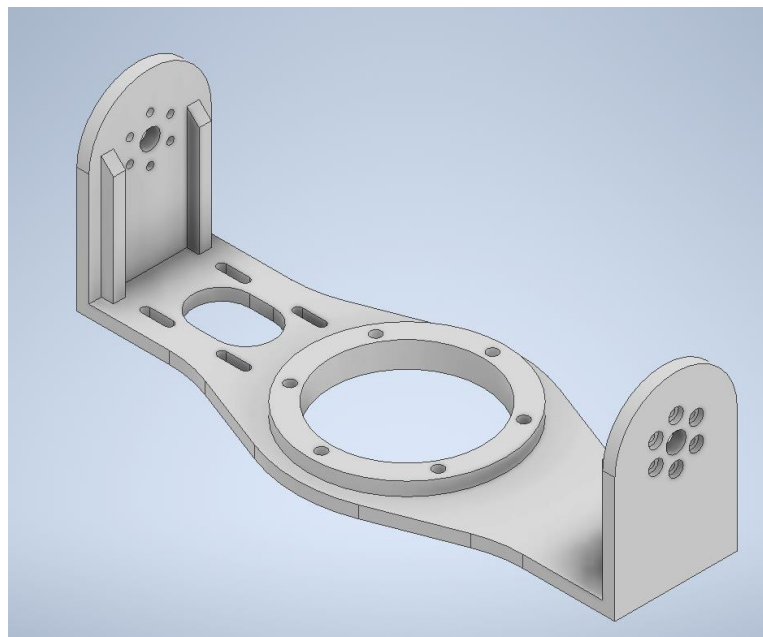


Рис. 3.4 – Деталь “Каретка осі обертання U”

Каретка осі обертання U має П-подібну форму, що забезпечує її жорсткість і компактність, дозволяючи ефективно інтегрувати елементи кріплення та передачі.

У центральній частині каретки розташоване кріплення для встановлення полімерного підшипника ковзання igus PRT-02-20. Це підшипник типу поворотного кільцевого підшипника (slewing ring bearing), який забезпечує плавність та точність обертання осі V.

Поруч із підшипником передбачено кріплення для крокового двигуна. Конструкція кріплення оснащена поздовжніми пазами для регулювання положення двигуна, що дозволяє налаштовувати натяг паса приводу осі V.

Вісь обертання каретки оснащена отворами для кріплення фіксатора штифта діаметром 8 мм. Ці отвори забезпечують надійне кріплення осі до конструкції.

Для запобігання виступу головок болтів у отворах передбачені спеціальні заглиблення. Це рішення сприяє збереженню гладкої поверхні конструкції та виключає можливість механічних перешкод під час обертання.

Ця конструкція каретки забезпечує надійність і точність роботи, поєднуючи легкість у налаштуванні та монтажі з ефективністю роботи осі обертання U.

### 3. Поворотний столик осі V:

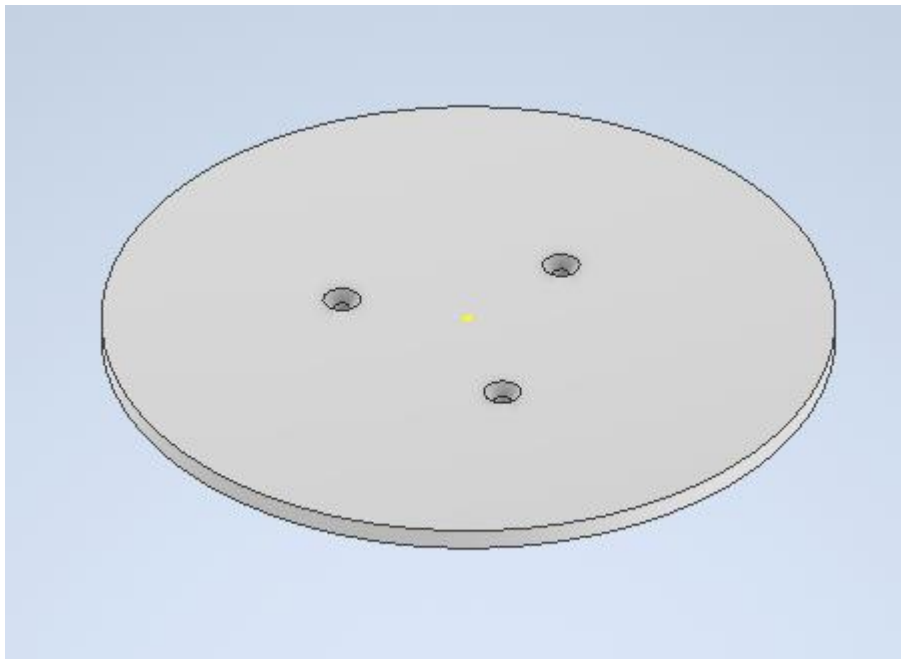


Рис. 3.5 – Деталь “Поворотний столик осі V”

Поворотний столик осі V є диском, виробленим з алюмінію, що має 3 отвори для фіксації на підшипнику. Отвори мають фаски для гвинтів з потайними головками

#### 4. Кріплення поворотного столику:

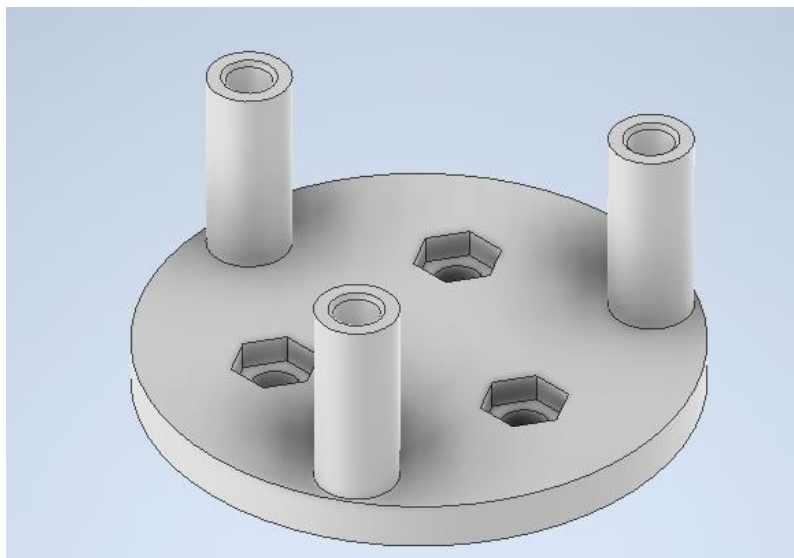


Рис. 3.6 – Деталь “Кріплення поворотного столику”

Ця деталь є алюмінієвим диском, який виготовляється методом фрезерування. На диску розташовано три вертикальні опори, у яких просвердлені різьбові отвори для фіксації столика. В основі диска передбачено три отвори, які відповідають стандартним кріпильним точкам підшипника. Кожен отвір в основі має спеціальний паз під гайку M5.

#### 5. Кріплення шківу осі V:

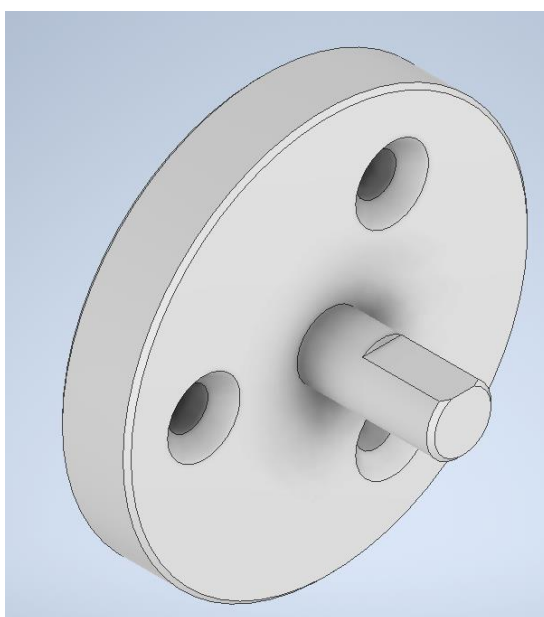


Рис. 3.7 – Деталь “Кріплення шківу осі V”

Ця деталь призначена для передачі крутного моменту з шківа пасової передачі на поворотний столик. Вона має форму двоступінчатого валу, що забезпечує надійне з'єднання шківа та підшипника. Перший ступінь вала призначений для кріплення деталі на підшипник. Він оснащений відповідними отворами для фіксації на підшипнику. Другий ступінь вала має діаметр, що відповідає посадковому отвору шківа. Другий ступінь має лиску, яка дозволяє зафіксувати шків за допомогою гвинтів, що запобігає його випадковому зсуву під час роботи.

### 3.2 Проектування збірки поворотної платформи

Після побудови основних компонентів платформи було побудовано збірку поворотної платформи. Для цього було створено файл типу «збірка» в середовищі Autodesk Inventor, та додано компоненти інструментом «Вставити».

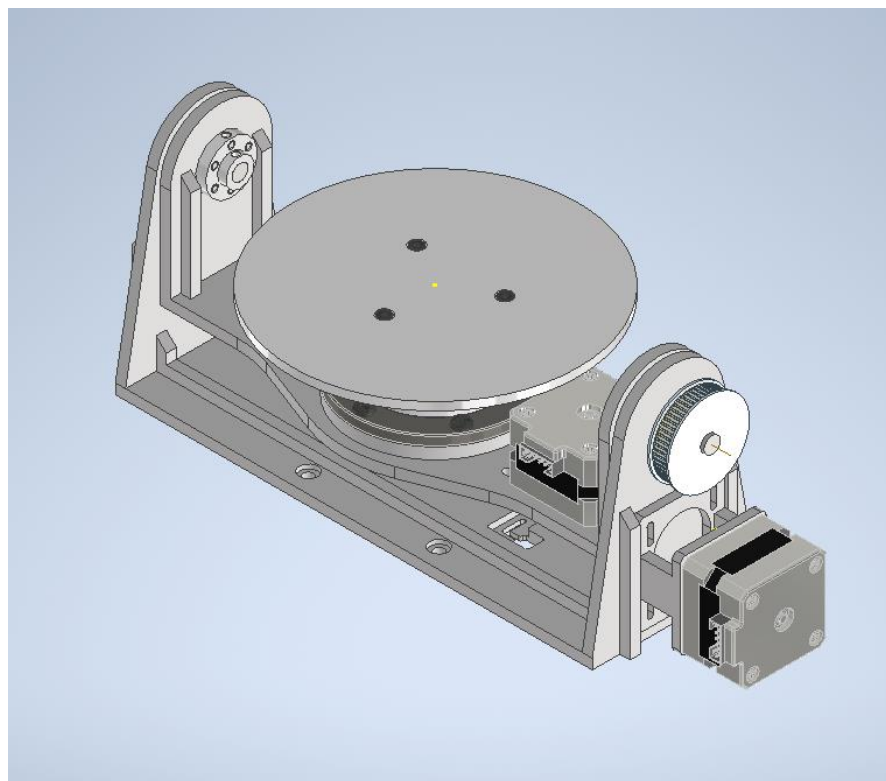


Рис. 3.8 – Збірка поворотної платформи.

Збірку можна умовно розділити на 3 вузли:

1. – Вузол основи (або каретка осі Y)

Цей вузол монтується на місці столику 3D-принтера, рухається лінійно вздовж осі Y. Вузол включає в себе деталь основи, кріплення для двигуна, сам двигун з шківом для приводу осі U. Також в отворах під вісь обертання U кріпляться фланцеві підшипники.

## 2. – Вузол осі обертання U

Цей вузол складається з наступних компонентів:

- Каретка осі обертання U;
- Два штифта, які є віссю обертання вузла;
- Два фіксатора штифтів, що монтуються гвинтами на каретці ;
- Шків приводу осі U, який фіксується на одному з штифтів ;
- Кроковий двигун приводу осі V;

## 3. – Вузол поворотного столику

Даний вузол складається з наступних компонентів:

- Поворотний столик осі V;
- Кріплення поворотного столику;
- Підшипник ковзання igus PRT-02-20 ;
- Кріплення шківу осі V;
- Шків приводу осі V, який фіксується своєму кріпленні ;

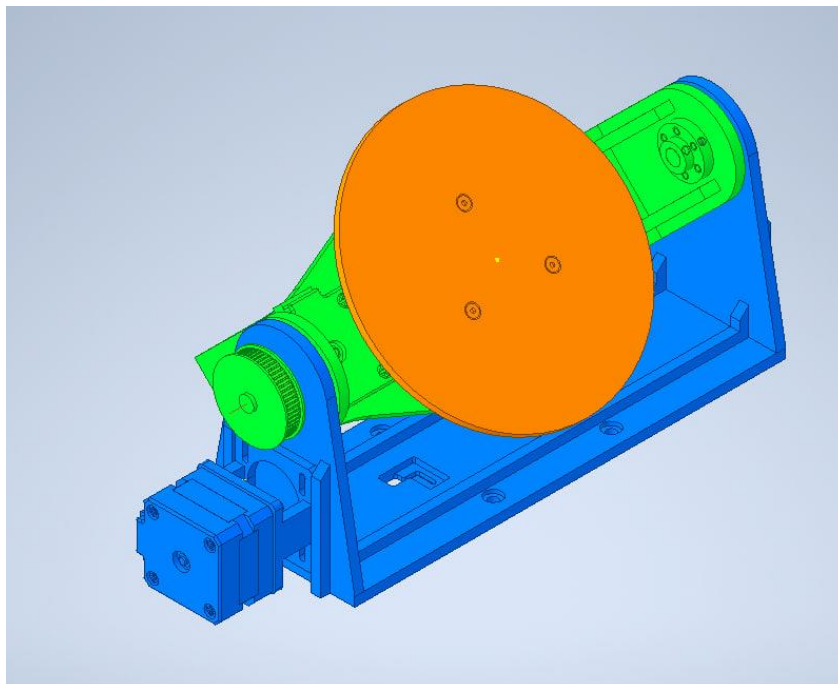


Рис. 3.9 – Зображення основних трьох вузлів поворотної платформи.

### 3.3 Розробка креслень поворотної платформи

У цьому розділі описано процес розробки креслень для поворотної платформи, яка є ключовим елементом модернізації 3D-принтера Ender 3 з додатковими керованими осями. Враховуючи обмеження щодо наявності готових креслень, для подальшого виготовлення компонентів поворотної платформи були розроблені детальні схеми збірки, а також специфікація, яка включає всі необхідні елементи для реалізації проекту.

#### 1. Схема збірки

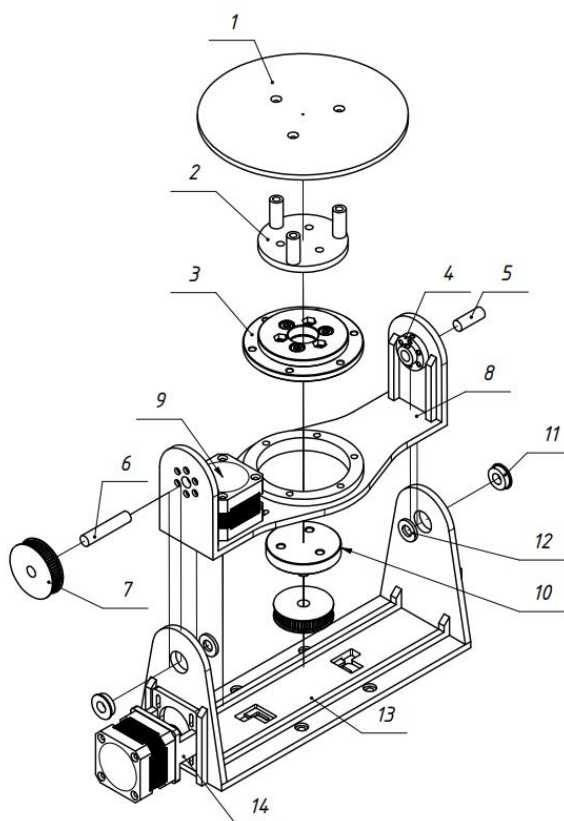


Рис. 3.10 – Схема збірки поворотної платформи.

Схема збірки є наочним представленням взаємодії всіх елементів поворотної платформи. Вона детально описує порядок складання механічних частин, включаючи встановлення двигунів, підшипників, металевих деталей та елементів кріплення. Метою цієї схеми є забезпечення чіткої та зрозумілої інструкції для користувачів, що дозволяє правильно зібрати платформу, мінімізуючи ймовірність помилок під час монтажу.

| №  | Позначення               | Назва   | Кіл. | Примітки         |
|----|--------------------------|---|------|------------------|
|    |                          | Документація  |      |                  |
|    | МД.НН.ММ.МК-31мп.01.01СК | Платформа для 3D-друку з додатковими обертовими осями | 1    |                  |
|    |                          | Деталі  |      |                  |
| 1  |                          | Верхня платформа                                      | 1    |                  |
| 2  |                          | Тримач платформи                                      | 1    |                  |
| 8  |                          | Каретка обертової осі V                               | 1    |                  |
| 10 |                          | Перехідник з поворотного вузла на шків                | 1    |                  |
| 13 |                          | Каретка обертової осі U                               | 1    |                  |
| 14 |                          | Фіксатор двигуна осі U                                | 1    |                  |
|    |                          | Стандартні вироби                                     |      |                  |
| 3  |                          | Поворотний підшипниковий вузол                        | 1    | виробник - Iguis |
| 4  |                          | Фіксатор штифтів 8мм                                  | 2    |                  |
| 5  |                          | Штифт ISO 2338 - 8h11x22-C                            | 1    |                  |
| 6  |                          | Штифт ISO 2338 - 8h11x40-C                            | 1    |                  |
| 7  |                          | Шків для пасової передачі GT2 60T                     | 2    |                  |
| 9  |                          | Кроковий двигун Nema 17                               | 2    | 17HM3410         |
| 11 |                          | Фланцевий підшипник 8мм                               | 2    |                  |
| 12 |                          | DIN9021 Шайба 8 A2                                    | 2    |                  |
|    |                          | Шків для пасової передачі GT2 20T                     | 2    |                  |
|    |                          | Ремінь GT2 6x200мм                                    | 1    | Привід осі U     |
|    |                          | Ремінь GT2 6x240мм                                    | 1    | Привід осі V     |

Рис. 3.11 – Специфікація

Специфікація містить перелік усіх компонентів, що використовуються для виготовлення поворотної платформи. Вона включає технічні характеристики, кількість деталей та матеріали, з яких вони повинні бути виготовлені. Основна мета цієї специфікації — надати чітке розуміння необхідних частин, що дозволяє ефективно організувати закупівлю компонентів та уникнути помилок під час виготовлення.

До основних елементів, зазначених у специфікації, відносяться:

Металеві деталі: точні розміри та матеріали для каретки, основи платформи та кріплень.

Електроніка: типи використовуваних плат керування, двигунів та інших електричних компонентів.

Підшипники та елементи кріплення: типи та розміри для забезпечення надійності конструкції.

Ця частина документації також включає рекомендації щодо матеріалів для виготовлення деталей, таких як сталь, алюміній або пластик, в залежності від вимог до міцності та ваги.

### 3. Технічні вимоги

Креслення платформи також повинні враховувати технічні вимоги, що стосуються стабільності та точності руху. Вони повинні бути забезпечені точними розмірами для мінімізації помилок під час збирання. Платформа повинна бути здатною витримувати навантаження та працювати при високих швидкостях обертання без втрати точності.

Для деяких елементів, таких як основа платформи та каретка обертання осі, передбачено використання 3D-друку. Це дозволить створити унікальні деталі, які будуть оптимізовані для конкретних потреб користувачів. Користувачам надаються файли для друку, адаптовані до найбільш поширених моделей принтерів, що дозволяє створювати індивідуальні деталі відповідно до їхніх вимог.

Таким чином, розробка креслень поворотної платформи складається з детальної схеми збірки, чіткої специфікації компонентів та технічних вимог до виготовлення деталей. Це дозволяє користувачам здійснити модернізацію свого принтера з максимальною ефективністю та точністю.

### 3.4 Розрахунки поворотної платформи

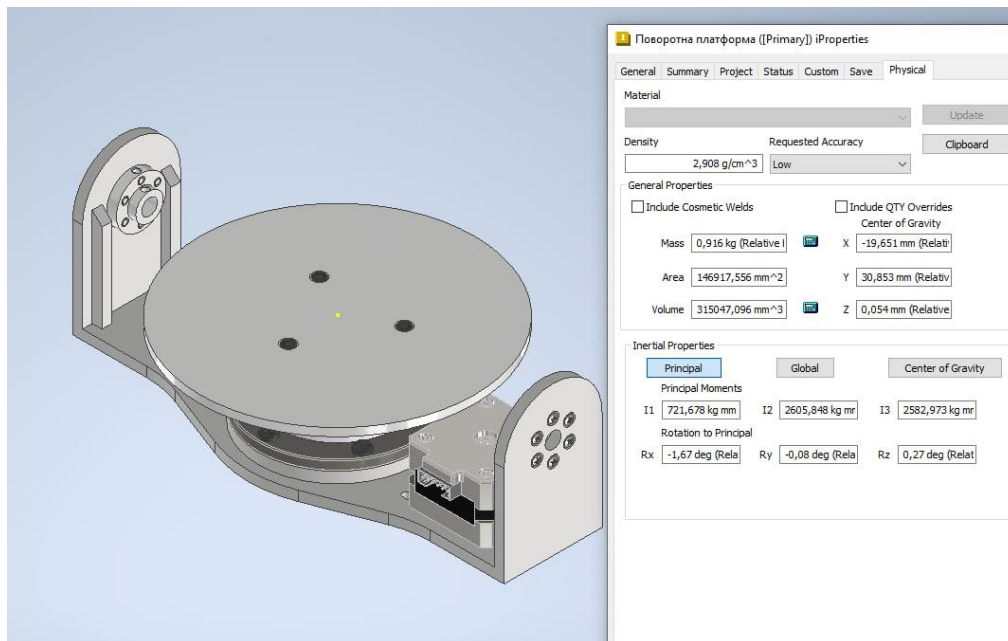


Рис. 3.12 – Властивості вузла поворотної платформи

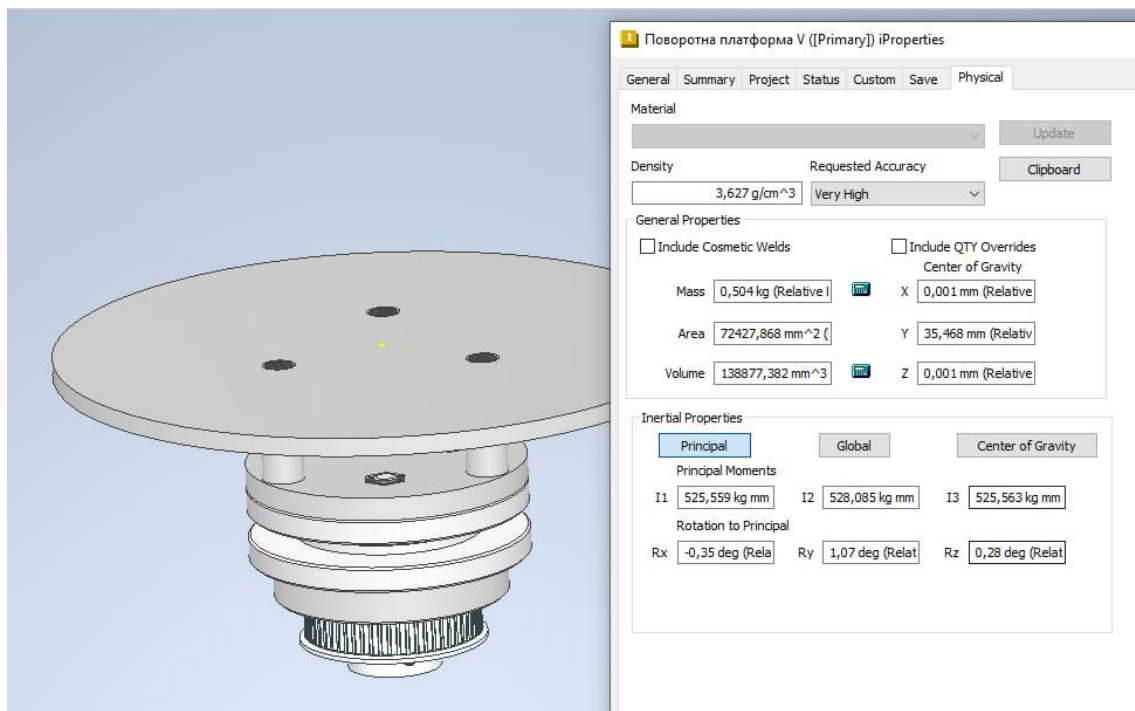


Рис. 3.13 – Властивості вузла поворотного столику

### Вихідні дані:

- Маса платформи:  $m = 840 \text{ г} = 0.84 \text{ кг}$
- Відстань від осі обертання до центру мас:  $r = 25 \text{ мм} = 0.025 \text{ м}$
- Гравітаційне прискорення:  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$
- ККД зубчасто-ремінної передачі:  $\eta = 0.95$  (95%)
- Коефіцієнт запасу:  $Safety\ factor = 1.5$
- Момент утримання крокового двигуна:  $M_{motor} = 0.24 \text{ Н}\cdot\text{м}$
- Передавальне число:  $i = 3$

Розрахунок сили тяжіння:

$$F = m \cdot g = 0.84 \text{ кг} \cdot 9.8 \text{ м/с}^2 = 8.23 \text{ Н}$$

Момент сили (момент утримання):

$$M = F \cdot r = 8.23 \text{ Н} \cdot 0.025 \text{ м} = 0.20575 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Момент з урахуванням ККД:

Враховуємо ефективність передачі:

$$M_{effective} = \frac{M}{\eta} = \frac{0.20575 \text{ Н}\cdot\text{м}}{0.95} = 0.2161 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Момент з урахуванням коефіцієнта запасу:

Для підвищення надійності роботи враховуємо коефіцієнт запасу:

$$M_{with\ safety} = M_{effective} \cdot 1.5 = 0.2161\ \text{Н}\cdot\text{м} \cdot 1.5 = 0.3242\ \text{Н}\cdot\text{м}$$

Момент, який генерує двигун з передачею 1:3:

Враховуємо передавальне число:

$$M_{out} = M_{motor} \cdot i = 0.24\ \text{Н}\cdot\text{м} \cdot 3 = 0.72\ \text{Н}\cdot\text{м}$$

Момент утримання платформи з урахуванням усіх параметрів (маса 840 г, центр мас на відстані 25 мм) становить:

$$M_{with\ safety} = 0.3242\ \text{Н}\cdot\text{м}$$

Момент, який генерує двигун із передачею 1:3, становить:

$$M_{out} = 0.72\ \text{Н}\cdot\text{м}$$

Оскільки  $M_{out} > M_{with\ safety}$ , двигун із такою передачею здатний утримувати платформу без проблем.

### Динамічний аналіз поворотної платформи

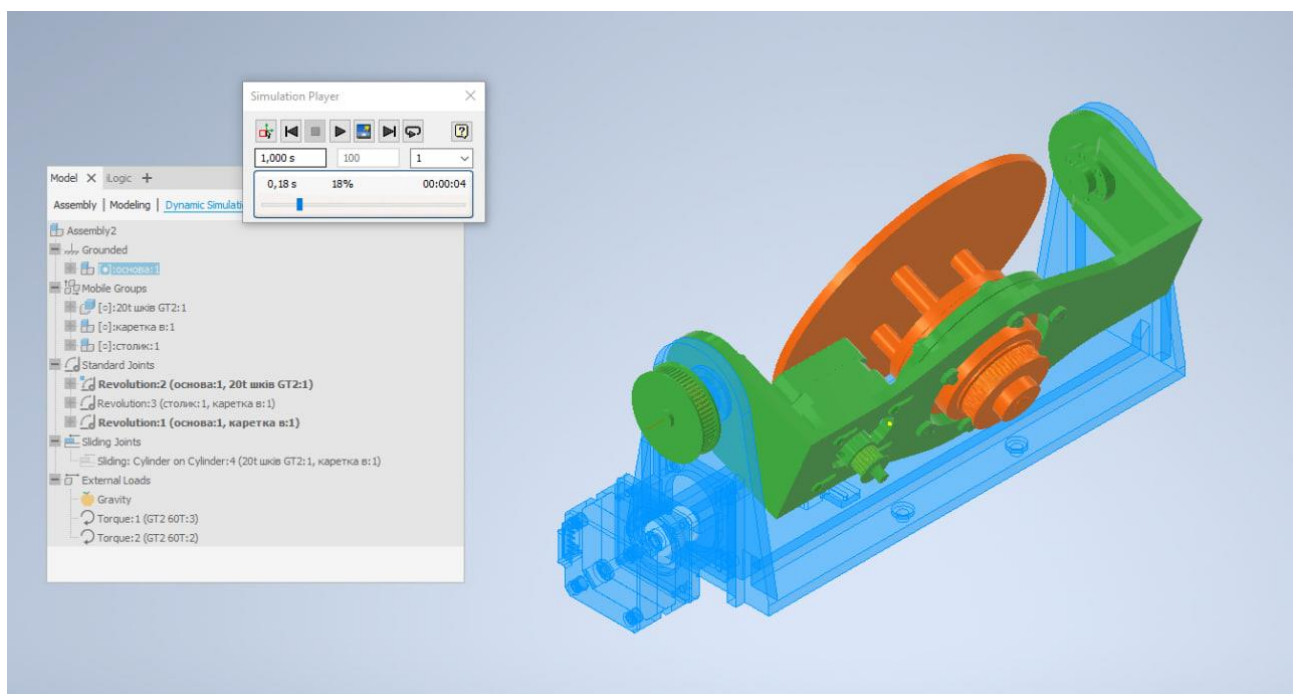


Рис. 3.14 – Створення динамічного аналізу руху поворотного столику

Для оцінки поведінки каретки під час обертання було виконано динамічне моделювання, яке дозволило отримати графіки моментів та сил, що діють на каретку в процесі обертання. Це включає в себе обчислення механічних навантажень, які виникають через взаємодію з двигунами, підшипниками та іншими компонентами системи.

Основні етапи аналізу включали:

- Моделювання обертання каретки по заданій траєкторії.
- Оцінка впливу різних швидкостей обертання на величину сил і моментів.
- Визначення величини сили тертя та реакцій, що виникають при контакті з підшипниками та іншими елементами конструкції.

Графіки моментів і сил, отримані в результаті динамічного аналізу, показують зміну навантажень під час руху каретки. Ці дані є основою для подальшого аналізу конструктивної міцності платформи, зокрема для визначення допустимих навантажень на матеріали та конструктивні елементи.

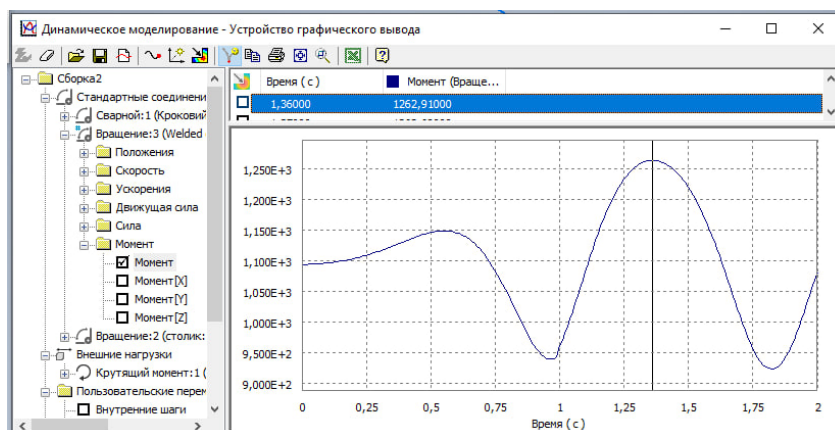


Рис. 3.15 – Графік моментів осі обертання U

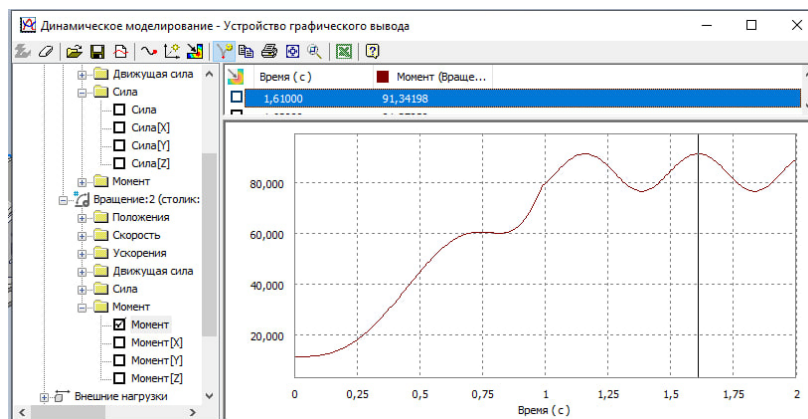


Рис. 3.16 – Графік моментів осі обертання V

На основі значень моментів та сил, отриманих у динамічному аналізі, був виконаний аналіз напружень у матеріалах, з яких виготовлена каретка та інші елементи поворотної платформи. Для цього використовували метод скінченних елементів (МКЕ), який дозволив розрахувати розподіл напружень по всіх критичних зонах конструкції.

Основні етапи аналізу:

- Моделювання геометрії каретки та інших елементів платформи.
- Визначення граничних умов, таких як фіксація точок кріплення та величина зовнішніх навантажень.
- Розрахунок напружень та деформацій у різних зонах конструкції за допомогою програмного забезпечення для числових розрахунків.

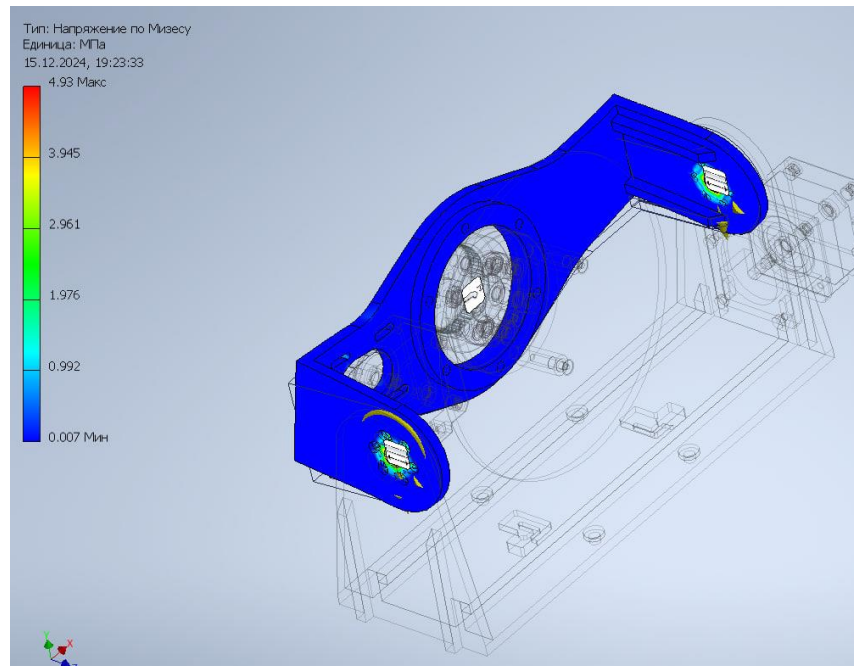


Рис. 3.17 – Симуляція напружень деталі

Результати аналізу показали, що максимальні деформації, що виникають в каретці, складають **0.057 мм**. Ці деформації є в межах допустимих значень для даного типу конструкцій, що свідчить про надійність та стабільність роботи платформи в умовах експлуатації.

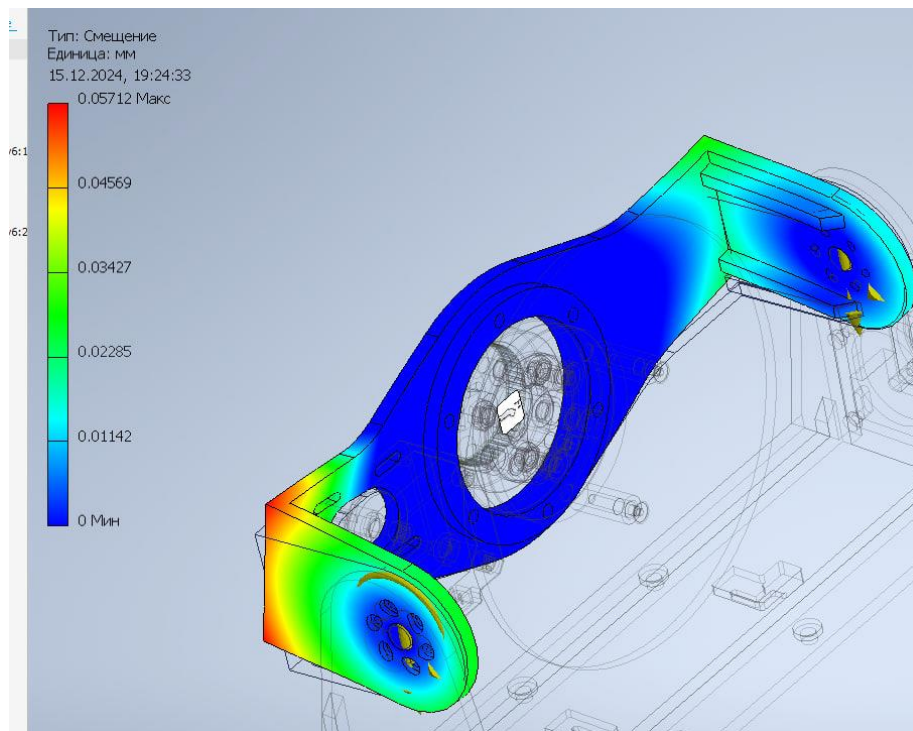


Рис. 3.18– Симуляція деформацій

Розрахунки показали, що конструкція поворотної платформи здатна витримувати навантаження, які виникають під час обертання, без значних деформацій. Максимальні деформації в 0.057 мм є цілком прийнятними для даного типу систем, що підтверджує правильність вибору матеріалів та конструктивних рішень. Отримані результати дають впевненість у тому, що платформа працюватиме стабільно навіть при максимальних навантаженнях, не втрачаючи точності та надійності.

## 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ

### 4.1 Ідея та унікальність стартапу

Стартап базується на ідеї створення універсального рішення для розширення функціональних можливостей 3D-принтерів шляхом впровадження додаткових керованих осей. Це рішення дозволяє користувачам розширити межі традиційного FDM-друку, включаючи можливість виготовлення складних геометричних деталей, які потребують нестандартного позиціонування. Основою продукту є комплект модернізації, який включає всі необхідні компоненти для інтеграції нових осей в існуючий 3D-принтер, зокрема плати керування, двигуни, металеві деталі, кріплення, а також файли для 3D-друку окремих елементів.

Основна унікальність полягає у тому, що продукт поєднує в собі:

- **Доступність:** Користувачам надається можливість самостійно виготовляти частину деталей (наприклад, основу платформи, кріплення двигуна та каретку обертання осі U) за допомогою 3D-принтера, що значно знижує кінцеву вартість комплекту.
- **Універсальність:** Рішення передбачає можливість адаптації до найбільш популярних моделей 3D-принтерів. Це забезпечується через різноманітність файлів для друку деталей, що дозволяє врахувати конструктивні особливості різних моделей принтерів.
- **Інноваційність:** На ринку є небагато готових рішень для додавання нових осей до FDM-принтерів. Даний стартап заповнює цю нішу, пропонуючи зручний і інтегрований підхід до модернізації.

Багато користувачів стикаються з обмеженнями стандартних 3D-принтерів, особливо коли йдеться про друк моделей зі складною геометрією або з потребою уникати опор. Традиційне рішення цієї проблеми – покупка більш дорогого багатовісного принтера – є фінансово обтяжливим. Натомість запропонований комплект модернізації дозволяє модернізувати вже наявний

принтер з мінімальними витратами, що робить цю технологію доступнішою для широкого кола ентузіастів.

Продукт містить усе необхідне для швидкої і безболісної модернізації:

Апаратна частина – якісні двигуни та металеві елементи, які забезпечують надійність і довговічність конструкції.

Електроніка – плата керування, сумісна з поширеними моделями 3D-принтерів, з попередньо налаштованим програмним забезпеченням.

Файли для 3D-друку – набір STL-файлів для друку деталей, які користувач може адаптувати під свій принтер.

Конкурентні переваги

У порівнянні з існуючими рішеннями, запропонований продукт має такі переваги:

Модульність – користувач може встановити лише ті функції, які йому дійсно потрібні.

Економія коштів – частина деталей виготовляється самостійно, що зменшує вартість комплекту.

Легкість інтеграції – мінімальні зміни конструкції принтера дозволяють користувачам уникнути складних модифікацій.

Підтримка – наявність докладної інструкції та допоміжних матеріалів забезпечує комфортну роботу навіть для новачків.

Таким чином, ідея стартапу спрямована на створення інноваційного, доступного та ефективного рішення для модернізації 3D-принтерів, яке дозволить користувачам отримати доступ до функціональності багатовісного друку без значних фінансових витрат.

## **4.2 Цільова аудиторія та ринкові перспективи**

Основною цільовою аудиторією стартапу є власники FDM 3D-принтерів, які зацікавлені у розширенні функціональних можливостей своїх пристроїв. Це переважно:

- Хобісти та ентузіасти 3D-друку: люди, які активно займаються друком моделей у домашніх умовах і бажають експериментувати з новими технологіями.
- Малі виробництва: підприємці, які використовують 3D-принтери для створення прототипів або малосерійного виробництва і потребують підвищеної гнучкості в друку.
- Інженери та студенти: фахівці та навчальні заклади, які використовують 3D-принтери в навчальних або дослідницьких цілях.

Багато користувачів стикаються з обмеженнями стандартних FDM-принтерів:

- Неможливість друку складних геометричних форм без використання підтримок.
- Недостатність функціональності для створення моделей зі складними кутами нахилу чи деталями, які потребують багатоетапного позиціонування.
- Висока вартість професійних багатовісних 3D-принтерів.

Запропонований комплект модернізації вирішує ці проблеми, пропонуючи економічне, доступне та модульне рішення, яке можна адаптувати під індивідуальні потреби.

Ринок 3D-друку зростає щороку, і в 2024 році очікується, що він досягне обсягів понад \$30 мільярдів. Значна частина цього ринку складається з власників домашніх і малих комерційних 3D-принтерів, які зацікавлені в модернізації своїх пристроїв.

Запропоноване рішення:

- Заповнює нішу між бюджетними FDM-принтерами та дорогими багатовісними системами.
- Має високу потенційну аудиторію, оскільки кількість власників FDM-принтерів стабільно зростає, і багато з них відкриті до вдосконалення обладнання.

- Дозволяє масштабувати бізнес за рахунок підтримки нових моделей принтерів і постійного оновлення файлів для друку деталей.

Оцінка конкурентного середовища

На ринку вже існують рішення для модернізації принтерів, але більшість з них:

- Складні у встановленні та налаштуванні.
- Неадаптовані до широкого кола моделей принтерів.
- Мають значно вищу вартість через використання дорогих матеріалів і складних механізмів.

У цьому контексті наш продукт є конкурентоспроможним завдяки простоті використання, доступності та можливості самостійного виготовлення частини деталей.

Запуск проєкту на платформах краудфандингу (таких як Kickstarter) дозволить протестувати ідею та залучити перших клієнтів серед ентузіастів. Подальший розвиток передбачає вихід на ринок через інтернет-магазини, такі як Ебай та Amazon, а також співпрацю з компаніями, які спеціалізуються на продажу 3D-принтерів і аксесуарів до них.

Таким чином, цільова аудиторія чітко визначена, а ринкові перспективи свідчать про високий потенціал для реалізації ідеї.

### **4.3 SWOT-аналіз проєкту**

SWOT-аналіз є інструментом стратегічного планування, який допомагає оцінити сильні та слабкі сторони стартапу, а також визначити можливості та загрози, пов'язані з його реалізацією.

Сильні сторони (Strengths):

- Низька собівартість комплекту модернізації завдяки використанню деталей, які можна надрукувати власноруч.
- Комплект підходить для популярних моделей FDM-принтерів і може адаптуватися до потреб користувачів.

- Відсутність подібних продуктів на ринку, які б пропонували просте й доступне рішення для додавання осей.
- Інтуїтивно зрозумілі інструкції для складання, файли для друку й мінімальні вимоги до модернізації.
- Орієнтація на міжнародну аудиторію завдяки онлайн-продажам.

#### Слабкі сторони (Weaknesses)

##### 1. Необхідність самостійного друку деталей

Деякі користувачі можуть не мати достатнього досвіду або доступу до якісного 3D-друку.

##### 2. Залежність від моделей принтерів

Рішення потребує адаптації до нових моделей принтерів, що може створити додаткове навантаження.

##### 3. Обмежена функціональність у порівнянні з професійними багатовісними принтерами

Продукт спрямований на аматорів, але не здатен повністю замінити промислове обладнання.

##### 4. Відсутність доступного програмного забезпечення для друку з використанням 5 осей

Поточні слайсери не підтримують багатовісний друк на базовому рівні, що ускладнює процес інтеграції для користувачів.

#### Можливості (Opportunities)

##### 1. Зростання ринку 3D-друку

Постійне збільшення кількості власників FDM-принтерів відкриває нові можливості для залучення клієнтів.

##### 2. Розширення асортименту

У майбутньому можна додати комплекти для інших типів принтерів або додаткові модулі (наприклад, осі V чи W).

##### 3. Маркетинг через краудфандинг

Платформи типу Kickstarter дозволять привернути увагу до проєкту та отримати фінансування для його масштабування.

#### 4. Співпраця з виробниками 3D-принтерів

Можливість створення партнерств для інтеграції продукту в стандартні комплектації принтерів.

#### Загрози (Threats)

##### 1. Конкуренція

Існуючі компанії можуть швидко розробити подібні продукти.

##### 2. Технологічні виклики

Проблеми з інтеграцією комплекту на окремих моделях принтерів або несподівані складнощі в роботі.

##### 3. Коливання цін на матеріали

Зростання вартості компонентів, таких як двигуни чи металеві деталі, може вплинути на прибутковість.

#### Висновок

SWOT-аналіз підтверджує великий потенціал проєкту, але наголошує на важливості вирішення ключових слабких сторін, таких як розробка доступного програмного забезпечення для багатовісного друку. Це стане значним кроком для підвищення привабливості продукту на ринку.

#### **4.4. Вирішення слабких сторін проєкту**

1. Відсутність доступного програмного забезпечення для друку з використанням 5 осей

Для подолання цієї проблеми пропонується наступний підхід:

Співпраця зі спільнотою розробників Open Source: налагодження співпраці з проєктами, які займаються розробкою слайсерів і САМ-систем, таких

як PrusaSlicer, Cura, або Fusion 360. Можливість створення окремого плагіна чи модуля для багатовісного друку.

Підготовка документації та шаблонів: Надання базових G-кодів та інструкцій для найбільш популярних завдань друку (наприклад, друк складних геометрій без підтримок). Це зменшить складність початкового використання технології.

Розробка інтеграції з існуючими слайсерами: Навіть базова інтеграція через попереднє програмування траєкторій обертання платформ може значно спростити використання продукту.

## 2. Необхідність самостійного друку деталей

Щоб мінімізувати складнощі для користувачів, запропоновано:

- Створення універсальних моделей для друку

Розробка кількох типів файлів, адаптованих до найпоширеніших моделей принтерів. Користувачам буде надано доступ до цифрової бібліотеки файлів для різних конфігурацій.

- Можливість замовлення готових деталей

Для тих, хто не має доступу до якісного 3D-друку, можна запропонувати придбати попередньо надруковані частини. Це підвищить зручність використання продукту.

## 3. Залежність від моделей принтерів

Щоб зменшити вплив цієї слабкої сторони, планується:

- Розробка універсальних кріплень

Створення стандартних адаптерів, які будуть сумісні з кількома популярними моделями FDM-принтерів.

- Гнучке оновлення бібліотеки деталей

Регулярне доповнення файлів для друку новими варіантами, орієнтуючись на відгуки клієнтів та аналіз ринку.

## 4. Обмежена функціональність у порівнянні з професійними багатовісними принтерами

Для підвищення функціональності комплекту:

Додавання інструкцій із застосування: Покрокові гайди з прикладами проєктів, які можна реалізувати за допомогою комплекту модернізації. Це допоможе користувачам максимально використовувати можливості системи.

Модульність продукту: Розробка додаткових аксесуарів і функцій (наприклад, автоматичне калібрування платформи), які можуть бути придбані окремо для підвищення гнучкості системи.

Реалізація вищезазначених рішень дозволить мінімізувати вплив слабких сторін, зробить продукт більш привабливим для кінцевих користувачів і підвищить його конкурентоспроможність. Стратегія передбачає тісну співпрацю зі спільнотою 3D-друку, гнучкість у підходах до адаптації продукту та орієнтацію на простоту й доступність для користувачів різного рівня підготовки.

#### **4.5. Фінансова модель стартапу**

Фінансова модель стартапу спрямована на визначення ключових витрат, доходів та прогнозування окупності проєкту. У моделі враховано витрати на виробництво, маркетинг, логістику та можливі доходи від продажу комплектів модернізації.

##### Витрати

- Розробка продукту
- Проектування механічних і електронних компонентів.
- Розробка інструкцій, файлів для 3D-друку та базового програмного забезпечення.
- Виробництво комплектуючих
- Закупівля двигунів, металевих деталей, плат керування, кріплень та інших компонентів.
- Витрати на виробництво та пакування продукту.
- Логістика
- Зберігання та транспортування комплектів.
- Митні витрати у разі міжнародних продажів.

## Маркетинг

- Реклама на платформах, таких як Etsy, Kickstarter, Amazon.
- Створення вебсайту та ведення соціальних мереж.
- Післяпродажне обслуговування
- Забезпечення технічної підтримки користувачів.

Розробка додаткових файлів для друку нових компонентів за запитом клієнтів.

## Доходи

Продажі комплектів модернізації. Основне джерело доходів — реалізація базових комплектів модернізації через онлайн-платформи.

Додаткові послуги:

- Продаж попередньо надрукованих деталей для користувачів, які не мають можливості друкувати їх самостійно.
- Можливий продаж розширених модулів або аксесуарів.
- Платний доступ до цифрових файлів. Опція для клієнтів, які бажають отримати готові файли для друку, адаптовані під конкретні моделі принтерів.

Прогноз доходів і витрат

Собівартість комплекту: орієнтовно 100-120 доларів

Ціна продажу: 200-250 доларів залежно від комплектації.

Маржинальність: близько 50-60%.

Окупність: у разі реалізації 300-500 комплектів очікується повернення початкових інвестицій у перший рік роботи.

Можливості залучення фінансування

- Краудфандинг

Платформи на кшталт Kickstarter допоможуть не лише зібрати кошти, але й привернути увагу до продукту.

- Гранти та програми підтримки стартапів

Можливість подачі заявки на отримання грантів для розвитку інновацій.

- Інвестиції

Залучення венчурного капіталу або стратегічних інвесторів, зацікавлених у розширенні ринку 3D-друку.

Фінансова модель базується на поєднанні низької собівартості, широкої доступності комплектів і активного маркетингу. Завдяки цьому стартап має високий потенціал для отримання стабільного доходу, з подальшим масштабуванням як асортименту, так і обсягів виробництва.

## Висновки

У результаті виконаної роботи було розглянуто та детально проаналізовано існуючі технології 3D-друку, зокрема FDM-технологію, та виявлено її недоліки, що обмежують можливості стандартних 3D-принтерів. Одним із найбільш перспективних напрямків вдосконалення цих технологій є додавання додаткових керованих осей, що дозволяє значно розширити функціональність принтерів, підвищити їх точність та стабільність у процесі друку. Це дозволяє отримати більш складні та деталіші моделі, що неможливо було б досягти на звичайних тривимірних принтерах.

Проект поворотної платформи з додатковими керованими осями, розроблений у межах даної роботи, є важливим кроком у розвитку технології FDM-принтерів. У результаті проектування було створено концепцію, яка дозволяє модернізувати існуючі моделі принтерів, зокрема Ender 3, шляхом додавання двох додаткових осей для покращення точності і можливостей друку.

Динамічні розрахунки, виконані для оцінки обертання каретки, показали, що конструкція здатна витримувати навантаження без критичних деформацій, а аналіз напружень підтвердив, що максимальні деформації не перевищують 0.057 мм, що є цілком нормальним і прийнятним для такої системи.

У межах стартап-проекту було здійснено розробку концепції продажу комплекту модернізації, що включає всі необхідні деталі для установки поворотної платформи. У результаті SWOT-аналізу було виявлено як сильні, так і слабкі сторони проекту, серед яких найбільшим викликом є відсутність доступного програмного забезпечення для друку з використанням 5 осей.

Фінансова оцінка собівартості та ціни для продажу комплекту дозволяє прогнозувати економічну ефективність стартапу, який має великий потенціал на ринку 3D-друку завдяки унікальності та високій якості запропонованого рішення.

У результаті виконаної роботи було створено перспективний продукт, який не лише розширює можливості існуючих 3D-принтерів, а й відкриває нові перспективи для розвитку індустрії 3D-друку в цілому.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://hlhrapid.com/knowledge/what-is-fdm-3d-printing/>
2. FDM vs SLA - 3D Printing Process Breakdown. *Markforged*.  
URL: <https://markforged.com/resources/blog/fdm-vs-sla> (дата звернення: 02.12.2024).
3. <https://www.printpool.co.uk/articles/design-for-sls-3d-printing-the-ultimate-guide>
4. <https://formlabs.com/eu/compare/markforged-vs-formlabs-fuse-1/>
5. Øyvind Kallevik Grutle. 5-axis 3D Printer : Master's Thesis. Oslo, 2015. 114 p.
6. <https://manufactur3dmag.com/working-fdm-3d-printing-technology/>
7. Yao, Y.; Zhang, Y.; Aburaia, M.; Lackner, M. 3D Printing of Objects with Continuous Spatial Paths by a Multi-Axis Robotic FFF Platform. *Applied sciences*. 2021. 15p.
8. Looking Around the 3D-Rotoprinter « Fabbaloo. *Fabbaloo*.  
URL: <https://www.fabbaloo.com/news/looking-around-the-3d-rotoprinter> (дата звернення: 03.12.2024).
9. How Important is Full Enclosure for 3D Printers? | Top 3D Shop. *Digital Manufacturing Store Top 3D Shop*. URL: <https://top3dshop.com/blog/how-important-is-full-enclosure-for-3d-printers> (дата звернення: 03.12.2024).
10. 3D Printer Drive System Overview. *3DPros*.  
URL: <https://3dpros.com/guides/fdmreference-drivesystem> (дата звернення: 03.12.2024).
11. NEMA 17 1.8° Hybrid Stepper Motor Catalog.  
URL: <https://www.uskoreahotlink.com/wp-content/uploads/NEMA-17-1.8-Hybrid-Stepper-Motor-Catalog.pdf> (дата звернення: 03.12.2024).
12. How to Build a 3D Printer: Linear Rods. *Learn, Create, and Automate with Dr. D-Flo*. URL: <https://www.drdflo.com/pages/Guides/How-to-Build-a-3D-Printer/Linear-Rod.html> (дата звернення: 03.12.2024).

13. V slot Wheels VS Linear Rails, Which one is a better option. *Kywoo3d*.  
URL: <https://www.kywoo3d.com/blogs/3d-printer-news/v-slot-wheels-vs-linear-rails> (дата звернення: 03.12.2024).
14. V slot Wheels VS Linear Rails, Which one is a better option. *Kywoo3d*.  
URL: <https://www.kywoo3d.com/blogs/3d-printer-news/v-slot-wheels-vs-linear-rails> (дата звернення: 03.12.2024).
15. Matthew Mensley Jackson O'Connell. 3D Printer Extruder – All You Need to Know. *all3dp.com*. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-extruder-guide/#i-13-the-3d-printer-nozzle> (дата звернення: 03.12.2024).
16. Ender-3 V2 3D Printer. *creality*.  
URL: <https://www.creality.com/products/ender-3-v2-3d-printer-csco> (дата звернення: 05.12.2024).
17. Повний комплект переходу на рейку Ender-3 з подвійною віссю Y на двох MGN12H URL: <https://prom.ua/ua/p2197056795-polnyj-komplekt-perehoda.html> (дата звернення: 05.12.2024).
18. *Nema 17 0.9 Degree Stepper Motor DataSheet*.  
URL: <https://5ororwxhiiqojij.leadongcdn.com/LS-17HM-aidlnBqmKinSRpqqmorllk.pdf> (дата звернення: 05.12.2024).
19. Duet3D. *Duet3D*. URL: <https://www.duet3d.com/duex5> (дата звернення: 15.12.2024).
20. Configurations/config/examples/linear\_axes/RAMPS 5 LINEAR\_AXES at bugfix-2.1.x · MarlinFirmware/Configurations. *GitHub*.  
URL: [https://github.com/MarlinFirmware/Configurations/tree/bugfix-2.1.x/config/examples/linear\\_axes/RAMPS%205%20LINEAR\\_AXES](https://github.com/MarlinFirmware/Configurations/tree/bugfix-2.1.x/config/examples/linear_axes/RAMPS%205%20LINEAR_AXES) (дата звернення: 15.12.2024).